

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA



TESIS DOCTORAL

**Sistemas de iluminación de altas prestaciones aplicados a bienes de
interés cultural**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Javier Muñoz de Luna Clemente

Directores

Daniel Vázquez Moliní
Antonio Álvarez Fernández-Balbuena

Madrid, 2016

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE
MADRID**

FACULTAD DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA



TESIS DOCTORAL

**Sistemas de iluminación de altas prestaciones
aplicados a bienes de interés cultural**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Javier Muñoz de Luna Clemente

DIRIGIDA POR:

Dr. D. Daniel Vázquez Moliní

Dr. D. Antonio Álvarez Fernández-Balbuena

Madrid, 2016

Sistemas de iluminación de altas prestaciones aplicados a bienes de interés cultural



MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Javier Muñoz de Luna Clemente

Dirigida por:

Dr. D. Daniel Vázquez Moliní

Dr. D. Antonio Álvarez Fernández-Balbuena

Universidad Complutense de Madrid

Madrid, 2015

A mi familia

Resumen

Esta memoria de tesis recoge el trabajo realizado con el objetivo de proponer mejoras en los sistemas que se utilizan para la iluminación de bienes de interés cultural. Para poder conseguir este objetivo, se han estudiado los procesos que relacionan la iluminación con la visualización y el deterioro de los materiales que componen los bienes culturales. Se ha desarrollado una metodología de caracterización óptica precisa adaptada al estudio de bienes culturales, que permite medir el factor de reflectancia con una alta precisión, tanto espectralmente como en el posicionamiento espacial del área medida. La metodología desarrollada se ha utilizado para la caracterización óptica de cuatro bienes culturales de muy alta relevancia, las obras “*Mujer en Azul*” y “*Guernica*”, del pintor Pablo Picasso, expuestas en el Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, la obra “*Muchacho con turbante y ramillete de flores*” del pintor Michiel Sweerts, perteneciente a la colección Thyssen-Bornemisza y las pinturas rupestres de la Cueva del Castillo, en Puente Viesgo, incluidas en la lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO.

El análisis de los datos obtenidos tras el proceso de caracterización ha permitido por un lado generar una base de datos espectrales para la evaluación del estado de conservación de los bienes estudiados y por otro ha servido como herramienta

de análisis objetivo de los resultados visibles tras procesos de restauración.

Se ha desarrollado una metodología de optimización de la distribución espectral de fuentes de iluminación aplicadas a bienes culturales, la optimización está basada en criterios de conservación y percepción que pueden variar en función de las necesidades específicas de cada caso de aplicación. La metodología permite asignar distinta importancia a los diferentes parámetros a optimizar de modo que hace posible encontrar soluciones individualizadas para problemas específicos. Se ha aplicado dicha metodología en la iluminación de cuatro paneles de arte rupestre en la “Cueva del Castillo” (Puente Viesgo), y se ha desarrollado un sistema de iluminación utilizando la tecnología LED que ilumina los paneles de arte rupestre con una distribución espectral optimizada para producir un mínimo daño sobre la pintura rupestre, un máximo contraste entre el color de la pintura y el color de la piedra sobre la que está pintada y una mínima diferencia entre el color de la pintura observado bajo el iluminante propuesto y bajo un iluminante similar al que utilizó el autor de las pinturas.

Abstract

This doctoral thesis comprehends the work performed to propose improvements to the systems used in the lighting of cultural heritage sites and goods. To achieve this goal, a research has been carried out on the processes which take place in the relations between lighting, visual perception and cultural goods deterioration. A specific optical characterization methodology adapted to the study of cultural heritage goods has been developed, allowing for the highly accurate measurement of reflectance factor both spectrally and on the spatial positioning of the measured area. This methodology has been used in the optical characterization of four greatly significant cultural assets – the paintings “Woman In Blue” and “Guernica” by Pablo Picasso, on display at Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía; the painting “Boy in a turban”, belonging to the Thyssen-Bornemisza collection; and the Paleolithic cave paintings in Cueva del Castillo, Puente Viesgo, which are listed in UNESCO’s World Heritage.

The analysis of the obtained data following the characterization tasks has served two main purposes – generating a spectral database to assess the degree of preservation of the goods studied; and providing a tool for the objective analysis of the visible results of restoration.

An optimization methodology has been developed for the spectral distribution of lighting sources used on cultural goods. The optimization is based on preservation and perception criteria

which can vary depending on the specific needs for each case. The methodology enables to shift priorities in the parameters to be optimized to find individualized solutions for specific problems. The discussed methodology has been applied in the lighting of four Paleolithic cave paintings panels in Cueva del Castillo, Puente Viesgo. The work carried out result in a LED technology based lighting system that lights the cave painting panels with an optimized spectral distribution which causes the slightest impact on the painting; produces the highest contrast between paint color and the color of the rock surface on which it is and provides the smallest difference between how the color of the paint is perceived under the proposed illuminant and how it would have been under the illuminant used by the author of the paintings.

Agradecimientos

Una vez finalizada la escritura de esta memoria de tesis, al pensar en todo el tiempo invertido, y en todos los momentos que me han traído hasta aquí me doy cuenta de que no hay palabras para agradecer suficientemente toda la ayuda que he recibido.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis directores Daniel Vázquez y Antonio Álvarez por haberme transmitido su pasión por la investigación y por haberme formado tanto (o más) a nivel personal como a nivel profesional, gracias por no haberme dejado caer en el desánimo en la recta final. Cuando por primera vez pensé en realizar el doctorado, uno de los codirectores de la tesis era Jesús Zoido, a quien me gustaría agradecer también la formación académica que recibí durante sus clases en la Universidad y la formación vital que nos grabó a hierro durante sus clases extraescolares. ¡Gracias Jesús!

No quisiera dejar de agradecer a mis compañeros de fatigas Berta, Mario “El Petador”, AlfoDomi, Manu, Concha, Marta, Yudy, Llopis, Alex, Bea, Fran, Erik, Darwin y Elske, los buenos momentos que hemos compartido estos años, y a todos los miembros del Grupo Complutense de Óptica Aplicada, con los que tanto he aprendido durante mis años de trabajo en la EUO (ahora FOYO).

El trabajo realizado no hubiera sido posible sin la ayuda del IPCE, personificado en Marián del Egidio, Juan Antonio Herráez, Araceli Gabaldón, Tomás Antelo, Carmen Vega y todo el personal del Laboratorio de Estudios Físicos del Instituto del Patrimonio Cultural de España.

Me gustaría también agradecer a todo el personal del Departamento Conservación y Restauración del Museo Reina Sofía, con quienes colaboramos en los trabajos realizados sobre el *“Guernica”* y *“Mujer en Azul”*. Sin la ayuda de Carmen Muro, Jorge García, Humberto Durán, Paloma Calopa, Ana Iruretagoyena, José Loren y demás personal del Museo ésta tesis no podría haberse llevado a cabo.

Me gustaría agradecer la ayuda que tuvimos durante el tiempo que estuvimos trabajando en la Cueva del Castillo por parte de Roberto Ontañón y Raúl Gutierrez, con quienes colaboramos en el trabajo realizado y quienes nos guiaron en la búsqueda de la solución mejor para la iluminación de las pinturas.

Me gustaría agradecer su ayuda también a Ubaldo Sedano y Andrés Sánchez, del Museo Thyssen-Bornemisza, con quienes colaboramos en el trabajo realizado sobre la obra *“Muchacho con turbante y ramillete de flores”*.

También agradezco a José Lens el impulso que me dio desde mi último puesto de trabajo antes de acabar la escritura de la tesis para animarme a finalizarla.

Quisiera mostrar mi más profundo agradecimiento a toda mi familia por el aliento que he recibido por su parte durante estos años en los que no ha sido siempre fácil, en especial a mi Madre, y a mis abuelos, que han sido los responsables de mi educación y la piedra en la que apoyarme para levantarme si en algún momento he tropezado. ¡Gracias Madre! Siento enormemente que mi abuelo no haya visto terminada esta tesis.

Quisiera agradecer a Manolo su ayuda constante en general, bien traduciendo textos, bien bebiendo botellines, pone el mismo empeño en todo lo que le propongo. ¡Gracias primo!

Quisiera agradecer a mis amigos, que son muchos, su presencia constante, porque seguramente no tienen ni idea que cada llamada, cada mensaje o cada palabra de ánimo, ha hecho posible que terminara de escribir esta tesis.

Por último quisiera agradecer a María el haber estado conmigo tanto tiempo, haber sido tan paciente y ser el faro que me guía en la oscuridad. Y agradecerle también que haya traído a Manuel a nuestra familia, a quien agradezco su existencia, porque sólo su existencia me ha servido de motivación para seguir escribiendo cuando estaba cansado.

Índice de contenidos

Resumen.....	v
Abstract	vii
Agradecimientos	ix
1. Introducción	5
1.1. Antecedentes y motivación del trabajo	5
1.2. Modelos de iluminación aplicados al patrimonio cultural	13
1.3. Objetivo general de la tesis	18
1.4. Objetivos específicos	19
1.5. Estructura del trabajo.....	20
2. Interacción de la radiación con la materia	25
2.1. Naturaleza de la luz	25
2.2. Espectro visible.....	27
2.3. Mecanismo de interacción	30
2.4. Colorimetría.....	33
3. Caracterización espectral y colorimétrica. Casos de aplicación.....	65
3.1. Caracterización de la obra “Guernica” de Pablo Picasso	65
3.2. Caracterización espectral y colorimétrica del proceso de restauración de la obra “ <i>Mujer en Azul</i> ” de Picasso	85
4. Sistemas avanzados de iluminación	101

4.1. Modelo actual de iluminación.....	101
4.2. Estudio de la variación entre metámeros al variar la iluminación en la obra “Muchacho con turbante y ramillete” de Michiel Sweerts.....	118
4.3. Sistema de iluminación espectralmente selectivo aplicado en arte rupestre	125
5. Conclusiones.....	143
Publicaciones generadas.....	147
Lista de figuras	149
Lista de tablas.....	153
Bibliografía	155

*"La ciencia es una sola luz, e iluminar con ella
cualquier parte, es iluminar con ella el mundo entero"*

Isaac Asimov

1. Introducción

1.1. Antecedentes y motivación del trabajo

Cuando en el año 2010 comencé a investigar en el campo de la iluminación del patrimonio cultural, las primeras preguntas que me vinieron a la cabeza fueron: ¿Qué es el patrimonio cultural y por qué es necesario iluminarlo de una manera especial?, ¿será un tema lo suficientemente interesante para poder escribir una tesis doctoral? Responder a la primera pregunta será una buena respuesta a la segunda y un buen punto de inicio para la memoria de tesis doctoral.

La Conferencia General de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) define patrimonio cultural en la convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural de 1972 [1] diferenciando tres clases: En primer lugar los monumentos, que incluye las *“obras arquitectónicas, de escultura o de pintura monumentales, elementos o estructuras de carácter arqueológico, inscripciones, cavernas y grupos de elementos, que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte o de la ciencia”*, en segundo lugar los conjuntos que incluye *“grupos de construcciones, aisladas o reunidas, cuya arquitectura, unidad e integración en el paisaje les dé un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte o de la ciencia”* y por último los lugares que abarcan *“obras del hombre u obras*

conjuntas del hombre y la naturaleza así como las zonas, incluidos los lugares arqueológicos que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista histórico, estético, etnológico o antropológico”.

La preservación del patrimonio cultural está cobrando cada vez más importancia en el panorama económico, cultural y político, ya que el patrimonio actúa como potenciador de la identidad de las culturas locales frente al proceso de globalización que vive la sociedad actual y como dinamizador de la economía al ser un fuerte reclamo para el turismo, cada vez más influenciado por la oferta cultural del destino [2] [3]. Si nos centramos en España, donde el turismo tiene un impacto económico enorme (representa casi un 11% del PIB y genera más del 11% de los empleos [4]), la importancia del patrimonio cultural es aún mayor. España adoptó en 1982 la convención sobre la protección del patrimonio mundial de la UNESCO [1] y tiene reconocidos como patrimonio de la humanidad 44 bienes [5] de los cuales 39 son bienes culturales, entre los que se incluye por ejemplo la Cueva de Altamira y arte rupestre paleolítico del norte de España.



Figura 1: Detalle del techo de los polícromos, perteneciente a la cueva de Altamira.

Nuestro país dispone de una legislación propia sobre patrimonio cultural [6] con la que se busca la protección y preservación del patrimonio cultural español, que se define como *“una riqueza colectiva que contiene las expresiones más dignas de aprecio en la aportación histórica de los españoles a la cultura universal”*, el objetivo final de esta ley es conservar el patrimonio cultural para acercarlo a un número cada vez mayor de ciudadanos *“en el convencimiento de que con su disfrute se facilita el acceso a la cultura y que ésta, en definitiva, es camino seguro hacia la libertad de los pueblos”* Pero, el patrimonio cultural, por su naturaleza material puede sufrir distintas alteraciones en sus características físicas, químicas o intangibles y verse en peligro de deterioro, e incluso pérdida y desaparición.

Existen distintos agentes de deterioro del patrimonio cultural [7], bien de tipo intrínseco, debidos a la naturaleza de los materiales y técnicas empleados para la composición de un elemento del patrimonio, bien de tipo extrínseco o externo a la naturaleza del material. Debido a la gran variedad de materiales y técnicas que se han empleado en la creación de los distintos bienes, para lograr una correcta conservación de los mismos es necesario un conocimiento exhaustivo de los efectos de los distintos factores sobre cada material. Así, los distintos materiales podrán ser protegidos de manera preventiva evitando el deterioro que sufrirían al exponerse a los factores extrínsecos que son más efectivos a la hora de causarles daños.

Con el objetivo de establecer una metodología de actuación unificada, coordinar las funciones de las distintas instituciones implicadas en la conservación, definir los criterios de intervención y optimizar los recursos de los que se dispone en función de las necesidades de los distintos bienes de interés cultural, el Ministerio de Cultura de España creó en 2011 el Plan Nacional de Conservación Preventiva (PNCP) [8]. En el Plan, se define conservación preventiva como *“una estrategia de conservación del patrimonio cultural que propone un método de trabajo sistemático para identificar, evaluar, detectar y controlar los riesgos de deterioro de los objetos, colecciones, y por extensión cualquier bien cultural, con el fin de eliminar o minimizar dichos riesgos, actuando sobre el origen de los problemas, que generalmente se encuentran en los factores externos a los propios bienes culturales, evitando con ello su deterioro o pérdida y la necesidad de acometer drásticos y costosos tratamientos aplicados sobre los propios bienes.”*

El plan nace como complemento a la legislación sobre patrimonio de los años 80, que no incluye la conservación preventiva en ninguno de sus artículos, aunque algunas normativas autonómicas sobre patrimonio sí tenían ya en cuenta algunos aspectos de conservación preventiva que quedan reflejados en los reglamentos de los museos. Los pasos que pretende seguir en PNCP son tres: en primer lugar analizar el estado de conservación, el uso y la gestión que se hace de los

bienes culturales, en segundo lugar analizar y valorar los principales riesgos de deterioro para establecer un método de seguimiento y control de los mismos, por último establecer una trazabilidad que permita garantizar que el uso que se da a los bienes culturales es compatible con su conservación.

La mayor parte de los riesgos de deterioro de los bienes de interés cultural que pretende analizar el PNCP son daños extrínsecos a los materiales como:

- “Daños físicos causados por la manipulación o disposición inadecuadas o por la presión sobre el uso de los mismos.

- Daños o pérdidas causados por actos antisociales como robo, expolio, vandalismo o conflictos armados.

- Daños o pérdidas causados por episodios catastróficos como incendios, terremotos o inundaciones.

- Daños causados por condiciones ambientales inadecuadas entre las que se incluyen los factores micro climáticos, las radiaciones asociadas a la luz y los contaminantes atmosféricos.

- Daños causados por el biodeterioro, generalmente asociados a condiciones ambientales inadecuadas y deficiencias en la disposición y mantenimiento de las instalaciones.

- Daños o pérdidas relacionados con la negligencia en los procedimientos de seguimiento y control.”

Para fomentar la identificación y el análisis de estos riesgos, así como para establecer métodos y técnicas de conservación, desde el año 2011 el Ministerio de Cultura está financiando proyectos de investigación con fondos destinados al PNCP.

Si nos centramos en la evaluación de la degradación causada por la radiación visible, la evaluación del daño que produce la iluminación sobre los objetos expuestos en museos se realiza, en la actualidad, según indica la norma 157:2004 de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE por sus siglas en francés), atendiendo a dos procesos principales: La acción fotoquímica de la luz y el efecto de la radiación térmica [9]. Los efectos de la acción fotoquímica de la luz se reflejan en variaciones en el color de los materiales y en cambios en las propiedades mecánicas que se traducen en el debilitamiento de los materiales. Los efectos de la acción térmica de la luz son más difíciles de evaluar por separado puesto que son menos notables a corto plazo, pero en conjunto, los cambios de temperatura favorecen la actividad química en los componentes de los bienes de interés cultural, fomentan la aparición de tensiones al producir ciclos de dilatación-contracción en materiales unidos con distintos coeficientes de expansión, pueden causar cambios superficiales al

influir en los ciclos de humedad de los materiales, fomentan la aparición de grietas, etc. [10]

La degradación que se produce depende del espectro de acción del material, es decir, de la responsividad espectral de ese material, que generalmente es diferente para cada región del espectro electromagnético que compone esa radiación. En la práctica esto genera algunos problemas a tener en cuenta, en primer lugar, el espectro de acción de los distintos materiales no es constante a lo largo del tiempo, es decir, varía en función de la cantidad de radiación que previamente haya recibido la superficie del material. En segundo lugar, la responsividad de cada material es distinta, y en general, las obras de arte están compuestas por muy diversos materiales, por lo que no existe una solución de iluminación estándar para todos los bienes de interés cultural, ni siquiera para determinadas clases de bienes, sino que en la mayoría de los casos hay que buscar soluciones específicas para cada caso o buscar una responsividad característica de cada bien [11].

Los espectros de acción que se utilizan actualmente para los cálculos de iluminación de los museos y lugares de exposición de patrimonio cultural se calcularon midiendo los cambios en el color de una serie de muestras de materiales típicamente expuestos en museos tras ser sometidos a sesiones de exposición a fuentes de iluminación de alta intensidad, principalmente

lámparas de xenón, en cámaras de envejecimiento acelerado [12], [13].

Como solución unificada, la norma CIE 157:2004 [9] clasifica los materiales en cuatro categorías en función de su sensibilidad a la luz visible. La tabla 1 muestra la clasificación.

Categoría	Descripción	Ejemplos
1. Insensible	El objeto está totalmente compuesto de materiales que son permanentes, en los que no hay sensibilidad a la luz.	La mayoría de metales, piedras, la mayoría del vidrio, cerámica genuina, esmalte, la mayoría de minerales.
2. Sensibilidad baja	El objeto incluye materiales duraderos que son ligeramente sensibles a la luz.	Pinturas al óleo y témpera, frescos, piel y madera no teñida, cuerno, hueso, marfil, laca, algunos plásticos.
3. Sensibilidad media	El objeto incluye materiales inestables que son moderadamente sensibles a la luz	Ropa, acuarelas, pasteles, tapicerías, impresos y dibujos, manuscritos, miniaturas, pinturas al temple, papel de pared, gouache, piel teñida y la mayoría de los objetos de historia natural incluyendo ejemplares botánicos, piel y plumas.
4. Sensibilidad alta	El objeto incluye materiales altamente sensibles a la luz.	Seda, colorantes conocidos por ser altamente inestables, papel de periódico.

Tabla 1: Clasificación en cuatro categorías de los materiales de acuerdo con la sensibilidad a la luz visible. Fuente CIE 157:2004 [9]

1.2. Modelos de iluminación aplicados al patrimonio cultural

Hasta el momento se ha tratado de explicar la importancia del patrimonio, la necesidad de su conservación y se han dado unas pinceladas a modo de introducción sobre la influencia de la iluminación en la degradación de los bienes culturales, pero, dado que la iluminación del patrimonio debe encontrar una solución de compromiso entre conservación y observación, a continuación se repasarán los factores de la iluminación a tener en cuenta para una correcta observación a la hora de iluminar bienes de interés cultural.

Como premisas principales, el sistema de iluminación que se aplique sobre los bienes a exponer debe crear unas condiciones óptimas para ver los objetos sin poner en riesgo la integridad de los mismos, esto se consigue principalmente con unos niveles de iluminación adecuados (establecidos por normativa en función del tipo de material expuesto [9]), con una selección correcta de las fuentes de iluminación para una reproducción del color que permita una mínima distorsión en la visualización de la obra y un mínimo deterioro para el espectro de acción de los materiales de los bienes iluminados y cuidando la colocación de las mismas de modo que se maximice el confort visual evitando el deslumbramiento, ya sea por visión directa de la fuente o por la aparición de brillos sobre las superficies observadas [11].

Los niveles de iluminación límites recomendados por la norma CIE 157:2004 establecen unos niveles máximos de iluminancia y de exposición anual a esa iluminancia en función de la clasificación en cuatro categorías. La tabla 2 muestra los niveles recomendados y los valores de la exposición anual límite.

Clasificación	Iluminancia máx. (lux)	Exposición límite (lux*h/año)
Insensible	Sin límite	Sin límite
Sensibilidad baja	200	600000
Sensibilidad media	50	150000
Sensibilidad alta	50	15000

Tabla 2: Límites de iluminancia y exposición anual límite recomendados por la normativa. Fuente CIE 157:2004 [9]

En cuanto a la selección de la fuente para minimizar la distorsión en la visualización del color del bien expuesto, el parámetro que se utiliza habitualmente para determinar la capacidad de reproducción del color de una fuente de luz es el índice de rendimiento cromático (CRI), éste parámetro se calcula midiendo la diferencia de color entre las 8 muestras de color de la carta Munsell al ser observadas bajo un iluminante patrón y bajo la fuente de iluminación que se quiere caracterizar [14]. El iluminante patrón es seleccionado entre los propuestos por la CIE [15], generalmente se utiliza el iluminante A o el iluminante D65.

El máximo valor para el CRI es 100. Para aplicaciones museísticas habitualmente se utilizan fuentes con un CRI superior a 85.

El uso de nuevas fuentes de iluminación, principalmente de tipo LED, ha puesto en entredicho la idoneidad del CRI para determinar la capacidad de una fuente de iluminación para reproducir el color. Recientemente se han creado nuevas escalas para la evaluación de la bondad de las fuentes de luz tipo LED para reproducir el color como la Color Quality Scale (CQS), que además de las muestras de color utilizadas para el cálculo del CRI utiliza 8 muestras más. [16]

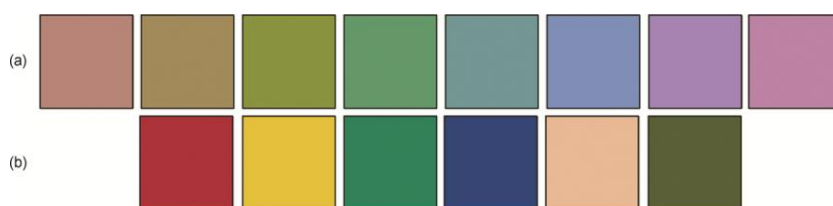


Figura 2: Muestras reflectoras de la carta Munsell (a) y muestras adicionales utilizadas para los cálculos de la escala CQS (b). Fuente Davis, Yohn [16]

Para minimizar el deterioro de los bienes de interés cultural al ser expuestos, las fuentes de iluminación que se utilicen deben tener al menos un filtro para ultravioleta (UV) que no deje pasar la radiación por debajo de los 400nm [11] buscando minimizar la acción fotoquímica de la iluminación y un filtro IR que no deje pasar la radiación por encima de los 720nm para minimizar la acción térmica de la iluminación [9].

Con respecto al cuidado del confort visual a la hora de seleccionar la iluminación adecuada para la exhibición de un bien de interés cultural, es necesario tener en cuenta tanto la posición del bien como la posición de la fuente. La principal causa de incomodidad visual que puede aparecer a la hora de observar un bien cultural es el deslumbramiento. El Diccionario de la Real Academia Española define deslumbramiento como *“turbación de la vista por luz excesiva o repentina”* [17], la CIE define deslumbramiento como *“condiciones visuales en las que existe un contraste excesivo o una distribución inapropiada de las fuentes de luz que molestan al observador o limitan su habilidad para distinguir detalles y objetos”* [18]. Las principales causas del deslumbramiento en la exhibición de bienes de interés cultural son la visión directa de fuentes de iluminación en el fondo o próximas a un bien exhibido en un nivel de iluminación inferior o por reflexión en superficies reflectantes como partes metálicas, partes del propio entorno o reflexiones en los propios bienes expuestos.

El deslumbramiento por visión directa de las fuentes de iluminación debe evitarse estudiando la colocación del bien en el entorno expositivo, la principal fuente de deslumbramiento por visión directa son las ventanas al exterior en las salas de exposición. El deslumbramiento por reflexiones puede evitarse cuidando la colocación de las fuentes de iluminación, evitando la zona de reflexión especular sobre el propio bien a iluminar [19].

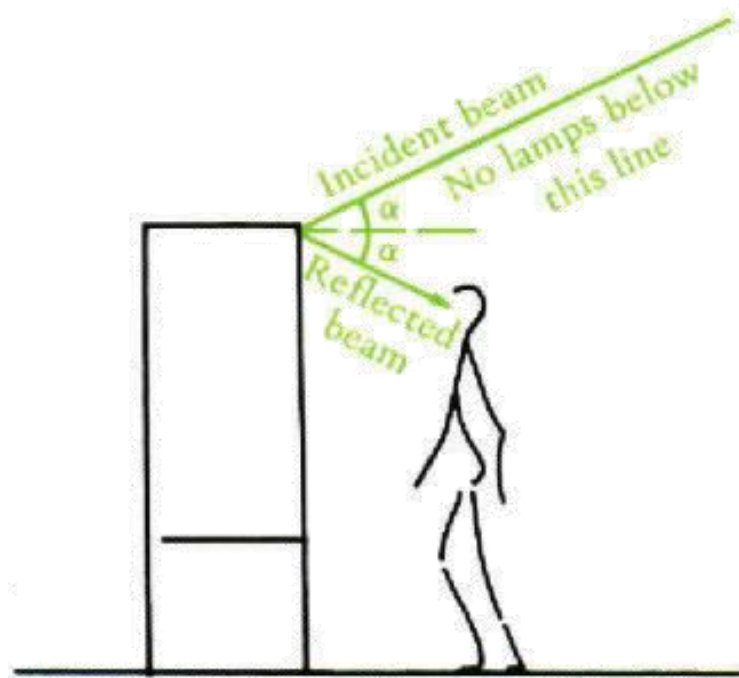


Figura 3: Ángulos de colocación recomendados para evitar el deslumbramiento.
Fuente G.Thomson [10]

Para profundizar más en el conocimiento de los mecanismos de deterioro que las fuentes de iluminación inducen en los materiales que componen los bienes de interés cultural, se dedica el siguiente capítulo a tratar de agrupar y explicar los mecanismos de interacción de la radiación con la materia que atañen a la iluminación de bienes culturales.

1.3. Objetivo general de la tesis

El objetivo general de esta tesis doctoral es el planteamiento de mejoras en los sistemas de iluminación que se utilizan habitualmente para la visualización de determinados bienes de interés cultural. Para abordar este objetivo se han estudiado los procesos que relacionan la iluminación con la visualización y el deterioro de los bienes de interés cultural y se ha profundizado en la mejora de las técnicas de caracterización espectral de los mismos.

Fruto de la puesta en común de estas dos actividades, finalmente se propone la aplicación de soluciones individuales de iluminación, de altas prestaciones, con un mínimo deterioro y unas condiciones de visualización óptimas, para bienes de interés cultural especialmente sensibles y que por su relevancia son objetivo de especial protección.

1.4. Objetivos específicos

Como primer objetivo de esta tesis doctoral se propone el desarrollo de una metodología de caracterización óptica de bienes de interés cultural que permita conocer las necesidades de iluminación de los mismos.

En segundo lugar propone la puesta a punto de un sistema de registro espectral que permita la medida del factor de reflectancia de una manera precisa tanto espectralmente como en el posicionamiento espacial del sistema.

Como tercer objetivo específico se propone el desarrollo de una metodología de análisis de las medidas espectrales sobre bienes de interés cultural que permita utilizar el sistema de registro espectral desarrollado para el control del estado de conservación de bienes culturales.

Además se propone el diseño de algoritmos de optimización para fuentes de iluminación aplicadas sobre bienes culturales basados en la optimización de la distribución espectral de la radiación emitida por la fuente. Estos algoritmos deben permitir asignar diferentes pesos a los distintos parámetros de optimización en función de las necesidades específicas de cada caso, que serán determinadas por el usuario final, en la mayoría de los casos restauradores y conservadores de museos e instituciones en las que se exponen los bienes de interés cultural.

1.5. Estructura del trabajo

Aunque el trabajo de investigación realizado ha sido desarrollado en un orden cronológico diferente al que se presenta en esta memoria, se ha optado por mantener esta organización para que quede explicado de una forma más clara.

En primer lugar, se ha desarrollado una introducción al significado de bien de interés cultural, a la importancia de su conservación y a los criterios que se siguen actualmente a la hora de plantear la iluminación de los bienes culturales.

En el segundo capítulo se hace una introducción a la naturaleza de la luz, se explican cuáles son los mecanismos de interacción de la radiación con la materia, se explican las consecuencias que tiene dicha interacción sobre los bienes de interés cultural y se plantea la metodología de evaluación espectral y colorimétrica de los materiales que forman parte típicamente de los bienes de interés cultural.

En el tercer capítulo se muestran dos casos de estudio en los que la aplicación del procedimiento de caracterización espectral y colorimétrica descrito en el segundo capítulo tuvo una especial relevancia, y en los que el análisis de los datos obtenidos tras la caracterización espectral permitió tener un registro para el análisis del estado de conservación de los bienes culturales estudiados.

El cuarto capítulo se centra en las fuentes de iluminación, en primer lugar se hace una recopilación de las fuentes típicamente utilizadas en la iluminación de los distintos bienes de interés cultural, en segundo lugar se abordan las nuevas fuentes de iluminación basadas en LED que se están utilizando y se establecen los criterios de optimización espectral de las fuentes de iluminación. Finalmente se presentan dos casos de estudio en los que fue necesaria la optimización espectral de la fuente de iluminación.

Por último se describen las conclusiones a las que se ha llegado tras el trabajo realizado y se plantean las pautas para continuar con ésta línea de investigación.

“El ojo que ves no es ojo porque tú lo veas;

es ojo porque te ve”

Antonio Machado

2. Interacción de la radiación con la materia

El presente capítulo describe los mecanismos de interacción de la radiación con la materia orientados al estudio de los bienes de interés cultural.

Para poder profundizar en el conocimiento de los cambios que producen las fuentes de iluminación sobre los materiales que componen los distintos bienes de interés cultural es necesario en primer lugar hacer una breve introducción a la naturaleza electromagnética de la luz.

2.1. Naturaleza de la luz

Se define radiación electromagnética (EM) como una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía. Las radiaciones electromagnéticas pueden ser tratadas bien como ondas bien como partículas.

Atendiendo a su naturaleza ondulatoria, las ondas electromagnéticas son generadas y se comportan de acuerdo a las ecuaciones de Maxwell [20]. Están formadas por la combinación de un campo eléctrico (\vec{E}) y un campo magnético (\vec{B}) oscilando perpendiculares entre sí, que se propagan en la dirección del vector \vec{v} , perpendicular a ambos. Según postulan las ecuaciones de Maxwell, la oscilación temporal del campo eléctrico genera un campo magnético perpendicular, y la

oscilación temporal del campo magnético genera un campo eléctrico perpendicular, es decir, la onda, una vez generada en su fuente, se puede desplazar en el vacío mediante la inducción electromagnética mutua de los campos que la componen [21]. Las ondas EM se propagan a la velocidad de la luz (c) en el vacío.

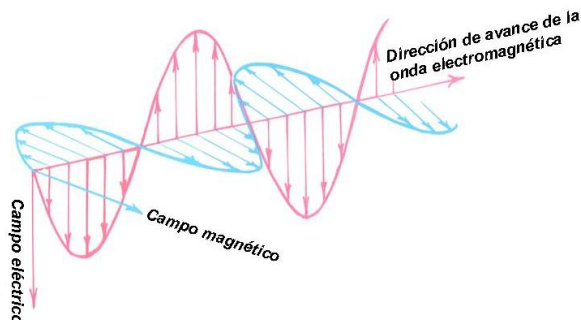


Figura 4: Representación gráfica de los campos eléctrico y magnético que componen una onda electromagnética.

Atendiendo a la naturaleza corpuscular de las radiaciones electromagnéticas, la radiación se puede considerar un haz de partículas llamadas fotones. Los fotones son las partículas elementales de las radiaciones electromagnéticas, carecen de masa en reposo y de carga eléctrica.

La cantidad de energía que transporta cada fotón (E) es inversamente proporcional a la longitud (λ) de la onda EM que define su movimiento.

$$E = \frac{h c}{\lambda}, \quad (2-1)$$

donde h es la constante de Planck y c es la velocidad de la luz en el vacío.

La distribución energética del conjunto de las radiaciones electromagnéticas se denomina espectro electromagnético, las radiaciones del espectro reciben distintos nombres en función de su longitud de onda, desde los rayos gamma, las radiaciones más energéticas (las de menor longitud de onda, en el orden del tamaño del núcleo atómico), pasando por el espectro visible, hasta las ondas de radio (las menos energéticas) con una longitud de onda del orden de los millares de metros.

2.2. Espectro visible

A la región del espectro electromagnético que es capaz de causar sensación visual al interaccionar con las células fotosensibles del ojo humano se le llama espectro visible o luz visible. El espectro visible está situado entre la región ultravioleta (UV) y la región infrarroja (IR) del espectro electromagnético. El rango aproximado de longitudes de onda que comprende el espectro visible va de 380nm a 780nm.

Cada longitud de onda del espectro visible es percibida por el ojo humano como un color diferente, esto se debe a que en la retina del ojo humano hay dos tipos de células sensibles a la luz (fotorreceptores), unas llamadas bastones, que son altamente sensibles a la luz y son responsables de la visión en condiciones de baja luminosidad (escotópicas) además de la percepción de aspectos fundamentales de la visión como el brillo o el tono, y otras llamadas conos, que son responsables de la visión en condiciones de visión con alta luminosidad (fotópicas). Dentro de

los conos hay tres tipos de células, los conos S, los conos M y los conos L, que actúan simultáneamente [22].

Como muestra la figura 5, cada tipo de cono tiene una sensibilidad diferente a las distintas regiones del espectro electromagnético, de modo que, cuando una radiación visible de una determinada distribución espectral llega hasta la retina del ojo humano, cada tipo de conos se verá excitado de una manera diferente por la radiación y tendrá una respuesta neuronal diferente. La respuesta neuronal al estímulo, viaja a través del nervio óptico hasta la corteza visual del cerebro donde se procesa y produce una sensación visual de color en función de las tres respuestas individuales de cada tipo de cono.

El hecho de que una respuesta visual de color sea resultado de tres respuestas individuales a un mismo estímulo se llama principio de tricromaticidad, y es la base de la ciencia del color. Bajo determinadas circunstancias, estímulos de color con distinta composición espectral pueden causar una respuesta visual idéntica, este fenómeno se conoce como metamerismo, y como veremos más adelante su conocimiento sirvió para sentar las bases de la colorimetría.

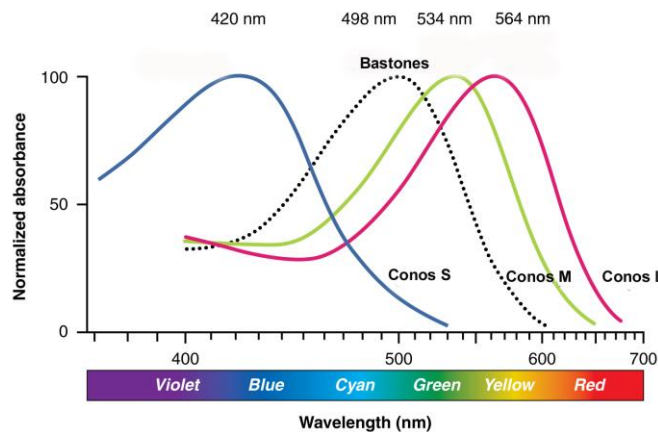


Figura 5: Absorbancia espectral normalizada de los cuatro tipos de fotorreceptores existentes en la retina humana.

Las longitudes de onda del espectro visible más próximas al ultravioleta, las más energéticas se corresponden a la gama de los azules, las longitudes de onda más próximas al IR y las menos energéticas, se corresponden a los rojos. Las longitudes de onda entre los dos extremos del espectro visible producen las sensaciones visuales correspondientes a todos los colores percibidos por el ojo humano. En la figura 6 se puede apreciar la correspondencia entre las distintas longitudes de onda del espectro visible y los colores que se perciben cuando interaccionan con las células fotosensibles del ojo humano.

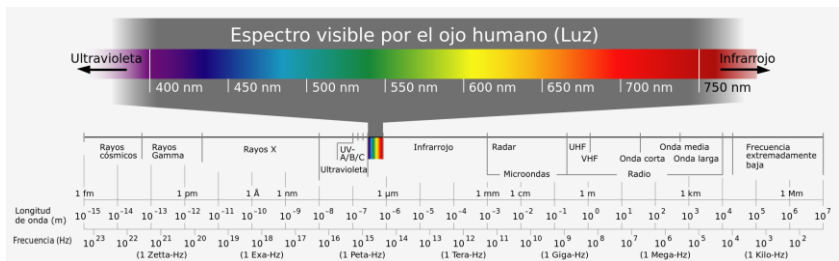


Figura 6: Espectro electromagnético con un detalle de la región visible.

2.3. Mecanismo de interacción

La energía que transportan las ondas electromagnéticas se pone de manifiesto cuando la radiación penetra en un medio material e interacciona con él, de modo que si la radiación electromagnética no interacciona con ningún medio material es indetectable [21]. En estas interacciones la radiación cede parte (o la totalidad) de su energía al medio que atraviesa mediante distintos mecanismos que dependen del tipo de radiación, de la cantidad de energía que se intercambie y de las propiedades físicas del medio con el que interacciona [23].

Como una forma de energía, la luz tiene el potencial de causar cambios en los objetos que la absorben [24], según postula la ley de Grotthus-Draper, *“sólo la radiación que es absorbida por una sustancia puede causar una reacción química”*. La absorción de una radiación es el proceso por el que esa radiación es captada por la materia. Pero que la radiación sea absorbida no es suficiente para que se produzca un cambio químico en la materia absorbente. *“Una molécula absorberá un fotón si la energía de ese fotón es exactamente o está muy próxima a la diferencia entre dos estados de la molécula. Cuando el fotón es absorbido se dice que la molécula se encuentra en estado de excitación o activada”* [24]. Esta radiación al ser absorbida puede provocar dos tipos de procesos una vez activada la molécula: en primer lugar procesos fotofísicos (la energía absorbida se transforma en calor o se reemite en forma de fluorescencia o fosforescencia)

que hacen que la molécula vuelva a su estado inicial, en segundo lugar procesos fotoquímicos, bien de tipo primario, en los que se produce un cambio en el estado de la molécula o incluso la ruptura de un enlace químico de la molécula (fotólisis), bien de tipo secundario, en los que la molécula activada actúa como iniciador de una segunda reacción a la que cede la energía [25].

La ley de equivalencia fotoquímica, también conocida como ley de Stark-Einstein [25] establece que en la etapa inicial de una reacción fotoquímica cada molécula es activada por la absorción de un fotón. El ratio entre moléculas activadas que sufren el cambio químico y fotones absorbidos se llama eficiencia cuántica de la reacción. A modo de ejemplo, en los procesos fotoquímicos primarios más relevantes a la hora de estudiar el deterioro de objetos típicamente expuestos en museos, como pinturas, barnices o telas, la eficiencia cuántica de las reacciones fotoquímicas más comunes está en el entorno de entre 10^{-5} y 10^{-2} , es decir, que para que una molécula del material sufre cambio químico por cada entre 100 y 100000 fotones absorbidos.

En el ámbito de estudio de este trabajo, el riesgo de fotólisis se debe principalmente a la radiación de las regiones ultravioleta y visible del espectro electromagnético, puesto que se considera que la región infrarroja por sí sola no tiene suficiente energía para romper los enlaces químicos, aunque en la práctica la radiación infrarroja causa incrementos en la temperatura tanto ambiental como superficial de los bienes de interés cultural que

también puede iniciar algunas reacciones adversas sobre los mismos [26].

La primera manifestación apreciable del daño fotoquímico en los objetos más sensibles es el cambio en el color, que comienza en las capas más superficiales del material sobre el que incide la radiación, una vez que la radiación comienza a penetrar en el material y activa las moléculas que la absorben. Las reacciones fotoquímicas de mayor eficiencia cuántica son las primeras en sucederse en la superficie de los objetos, si la incidencia de fotones continúa, en primer lugar, las moléculas susceptibles de sufrir las reacciones fotoquímicas de una mayor eficiencia cuántica terminan por sufrir esa reacción, por lo que esa reacción termina por saturarse. En segundo lugar, comienzan a aparecer los efectos de las reacciones con una menor eficiencia cuántica y de reacciones secundarias sobre los productos resultantes de las anteriores reacciones, que finalmente afectan a las propiedades mecánicas de los objetos produciendo debilitamiento, grietas, pulverización de los materiales y otros efectos indeseados catalogados como daño fotomecánico [10].

Si nos centramos en el estudio de los materiales que componen los bienes de interés cultural, los cambios químicos producidos por las radiaciones que inciden sobre ellos a nivel molecular se pueden estudiar bien mediante ensayos que analizan la composición química del material, para lo que generalmente es necesario tomar pequeñas muestras de material

y destruirlas en el ensayo como es el caso de la cromatografía de gases, o bien estudiando los cambios en las propiedades físicas de los materiales que se producen cuando cambian las propiedades químicas, para lo que pueden buscarse alternativas a los ensayos destructivos, como puede ser el estudio de las variaciones en el color.

2.4. Colorimetría

Como se comentaba en el apartado anterior, para que una radiación cause un cambio fotoquímico en un material la radiación tiene que ser absorbida. Cuando una radiación llega hasta la superficie de un material, parte de la radiación es reflejada, parte de la radiación es absorbida y parte de la radiación pasa a través del material, es decir es transmitida. La parte de la radiación incidente que permite que ese material sea visto por un observador es la radiación que llega hasta el observador una vez reflejada o transmitida por el material.

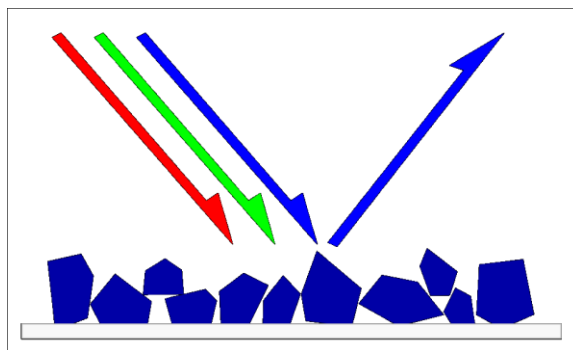


Figura 7: Esquema de la radiación reflejada que permite la visión de un material.

Se ha comentado que la primera manifestación del daño fotoquímico sobre los materiales sensibles a la luz es la variación en el color del material, pero, ¿cómo se evalúan esos cambios?

2.4.1. Psicofísica

Como se ha definido en el apartado 2 del presente capítulo, el color es la sensación visual que producen las distintas radiaciones al interaccionar con las células fotosensibles de la retina del ojo humano y ser procesadas por el cerebro, al ser una percepción, no es accesible para su medida directa mediante un instrumento, por lo que la colorimetría se va a centrar en la medida del estímulo que causa la sensación visual [27]. La colorimetría es la ciencia y la tecnología utilizada para cuantificar y describir físicamente la percepción humana del color [28].

Existen dos formas principales de producir estímulos de color, la mezcla aditiva y la mezcla sustractiva de colores. La mezcla aditiva se da cuando el estímulo se consigue al superponer la luz proveniente de fuentes de iluminación con distintos colores, generalmente se utilizan tres fuentes de luz, una roja, otra verde y otra azul (los tres colores primarios en mezcla aditiva de colores). Las variaciones de intensidad de las tres fuentes permiten conseguir la práctica totalidad de colores. La mezcla aditiva de colores se da por ejemplo cuando se observa la imagen de una televisión. La mezcla sustractiva de colores se da cuando el estímulo de color se consigue mezclando tintes, se dice que es sustractiva porque el estímulo de color se consigue al sustraer

(absorber) los tintes una parte de la composición espectral de la fuente de iluminación bajo la que se observan [27]. Los colores primarios que se utilizan generalmente para mezcla sustractiva son el cian, el magenta y el amarillo. La mezcla sustractiva se da cuando se observa cualquier estímulo que no emite su propia luz.

Si nos centramos en la definición del comportamiento de la mezcla aditiva de colores, existen **cuatro leyes empíricas de igualación de color** formuladas por Grassmann en 1853 que son las siguientes [27]:

- 1.- Es posible conseguir todos los colores percibidos mezclando tres franjas del espectro visible en la proporción de intensidad adecuada, siempre que ninguno de los iluminantes pueda ser obtenido por mezcla de los otros dos. (Establece los primarios Rojo, Verde y Azul).
- 2.- La luminancia del color igualado es la suma de las luminancias de los primarios utilizados.
- 3.- Si dos estímulos producen la misma percepción de color, es posible variar su luminancia sin que varíe la igualdad.
- 4.- Si se suman dos colores cualesquiera obteniéndose otro color resultante, éste podría haberse obtenido también sumando los primarios de cada uno de los colores origen.

Para poder cuantificar el color, fue necesario definir un observador estándar que permitiera unificar los cálculos independientemente del instrumento que los realizara.

Los experimentos que llevaron a la definición del observador estándar se realizaron utilizando estímulos de color conseguidos mediante mezcla aditiva. Se mostró a los sujetos de estudio un campo bipartito circular que subtendía 2° en su campo visual. La mitad del campo mostraba un estímulo con una distribución espectral casi monocromática ($\pm 2.5\text{nm}$ de anchura espectral) que iba variando secuencialmente barriendo todo el espectro visible y que servía como patrón a igualar [29], [30]. En la otra mitad del campo bipartito se mostraba la mezcla aditiva de tres fuentes monocromáticas (roja, verde y azul), cuya intensidad podía ser regulada por el observador accionando tres atenuadores variables. El observador variaba la intensidad de las fuentes de manera que, gracias al fenómeno del metamerismo en la mayor parte de los casos, el sujeto percibía los dos campos bipartitos como iguales, el estímulo patrón quedaba caracterizado por las tres luminancias correspondientes a cada primario [28]. Los experimentos utilizaron como colores primarios fuentes de iluminación de $\pm 2.5\text{nm}$ de anchura espectral centradas en 700nm (R), 546.1nm (G) y 435.8 (B). Algunos de los estímulos patrón no pudieron ser igualados con los tres primarios seleccionados, así que la igualación se consiguió añadiendo una pequeña proporción del primario R al estímulo patrón. En la

figura 8 se muestran las funciones medias de igualación de color ($\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ y $\bar{b}(\lambda)$) obtenidos en los experimentos citados, los valores negativos de $\bar{r}(\lambda)$ indican los estímulos patrón monocromáticos a los que fue necesario añadirle el primario R para que pudieran ser igualados.

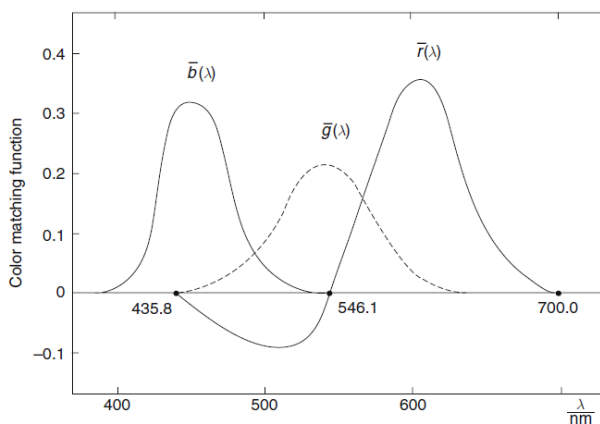


Figura 8: Funciones $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ y $\bar{b}(\lambda)$ de igualación de color obtenidas en los experimentos de Wright y Guild. Fuente Georg A. Klein [31]

El hecho de que el estímulo de color utilizado para estos experimentos tuviera un tamaño angular de sólo 2° se justifica por la distribución de células fotosensibles en la retina. Como es sabido, las células fotosensibles responsables de la visión del color son los conos. Se estima que en la retina humana hay aproximadamente 6.5 millones de conos y 120 millones de bastones, distribuidos de manera no uniforme. La zona de la retina que corresponde a la parte central del campo visual, llamada fovea contiene únicamente conos, de modo que, si la visión del estímulo utilizado para el experimento implica

únicamente la visión foveal, la respuesta obtenida será exclusivamente debida a los conos.

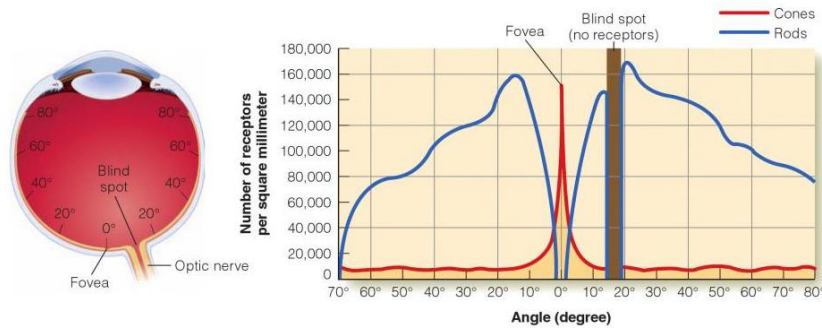


Figura 9: Distribución en retina de conos (cones) y bastones (rods). Fuente: Goldstein [22].

En 1931 la CIE cambió los primarios de las funciones de igualación de color obtenidas en los experimentos de Wright y Guild para por un lado eliminar la parte negativa de $\bar{r}(\lambda)$ y por otro lado forzar la función $\bar{g}(\lambda)$ a ser similar a la curva de eficiencia espectral del ojo humano ($V(\lambda)$) fijada en 1924 por la CIE. Los nuevos primarios utilizados, llamados “*primarios virtuales* \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} ” [31] satisfacían los siguientes requisitos:

- \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} del mismo modo que los primarios R, G y B, eran independientes unos de otros, es decir no eran reproducibles mezclando ninguno de los otros dos.
- Las nuevas funciones de igualación del color $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$ siempre tenían valores ≥ 0 .
- Los valores de los primarios \bar{X} y \bar{Z} estaban seleccionados para que el valor de \bar{Y} fuera el único

que contuviera la información sobre la luminosidad del color que se midiera ($\bar{y}(\lambda) \approx V(\lambda)$).

A las nuevas funciones de igualación del color se le llaman funciones estándar de igualación de color (SCMF por sus siglas en inglés), y al observador “ideal” cuyas funciones de igualación del color se corresponden con $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$ se le llama Observador Patrón CIE de 2° [27]. Todos los cálculos colorimétricos realizados durante el periodo de investigación de esta tesis doctoral se han realizado utilizando el Observador patrón de la CIE de 2°. La figura 10 muestra las SCMF.

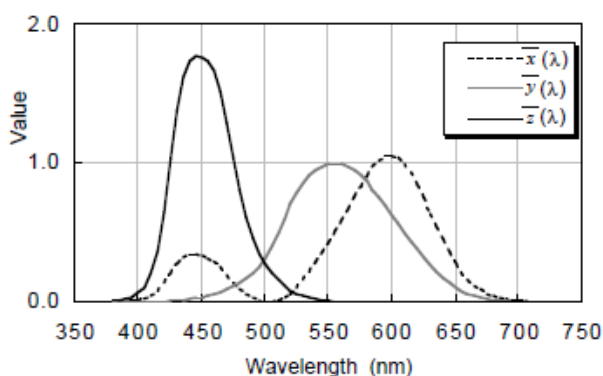


Figura 10: Funciones estándar de igualación de color establecidas en 1931 por la CIE.
Fuente: Y. Ohno [28].

Para obtener los valores colorimétricos de cualquier estímulo de color es necesario calcular los valores triestímulo (X , Y , Z), que son tres valores que definen el color de la función de estímulo de color relativo ($\Phi(\lambda)$) que llega hasta un detector en función de las funciones de igualación del color del Observador

patrón de la CIE. Las ecuaciones que definen los valores triestímulo son las siguientes [32]:

$$X = k \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad (2-2)$$

$$Y = k \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad (2-3)$$

$$Z = k \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \quad (2-4)$$

donde k es una contante de normalización. Si las medidas colorimétricas que se están realizando son absolutas la constante de normalización toma el valor $k = 683 \text{ lm/W}$. En medidas colorimétricas relativas toma valores entre aproximadamente 0 y 100 de acuerdo a la ecuación (2-5).

$$k = \frac{100}{\int_{380}^{780} E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}, \quad (2-5)$$

donde $E(\lambda)$ es la distribución espectral relativa de la fuente de iluminación utilizada.

El valor de 683 lm/W es el máximo valor posible de eficacia luminosa de una radiación (definiendo eficacia luminosa como el ratio entre flujo luminoso y flujo radiante de la fuente). La longitud de onda de la radiación con una máxima eficacia luminosa es de 555nm en condiciones fotópicas de iluminación y de 507nm en condiciones escotópicas.

Cuando se realizan cálculos para estímulos de color emisores de luz, como fuentes de luz o pantallas, $\Phi(\lambda)$ viene por

la radiancia espectral de la fuente observada. Cuando se realizan cálculos de color para estímulos iluminados por fuentes externas, como son pinturas y cualquier objeto que no emite luz por sí mismo, la función de estímulo de color relativo ($\Phi(\lambda)$) viene dado por la ecuación (2-6) en caso de estímulos de color observados por reflexión y (2-7) en caso de estímulos de color observados por transmisión:

$$\Phi(\lambda) = E(\lambda)\rho(\lambda) , \quad (2-6)$$

$$\Phi(\lambda) = E(\lambda)\tau(\lambda) , \quad (2-7)$$

donde $\rho(\lambda)$ es el factor de reflectancia espectral o reflectancia espectral del estímulo de color y $\tau(\lambda)$ es el factor de transmitancia o transmitancia espectral. La reflectancia espectral es el ratio entre flujo radiante reflejado por un material y el flujo radiante incidente [27].

2.4.2. Iluminantes patrón

Como se ha visto, para poder realizar cálculos colorimétricos es necesario tener en cuenta la distribución espectral ($E(\lambda)$) de las fuentes de iluminación bajo las que el estímulo de color es observado. Para unificar las fuentes de iluminación bajo las que se observan los distintos estímulos de color, y permitir realizar comparaciones de magnitudes colorimétricas, la CIE propone el uso de iluminantes patrón [33]. Estos iluminantes permiten predecir cuál sería el color percibido

por un observador bajo distintas fuentes de iluminación de uso habitual en luminarias para iluminación.

Por ejemplo, el Iluminante A propuesto por la CIE se corresponde con una fuente de iluminación de filamento de tungsteno media, el iluminante B se corresponde con la luz directa del Sol. Los iluminantes D se corresponden a la distribución espectral de la luz natural en distintas fases del día, por ejemplo, el D50 es la luz del día con una temperatura de color de 5000K, el D65 se corresponde con luz natural con una temperatura de color de 6500K [33]. Los iluminantes F se corresponden a distintos tipos de fluorescentes utilizados habitualmente en proyectos de iluminación. La figura 11 muestra las distribuciones espectrales normalizadas de algunos de los iluminantes propuestos por la CIE.

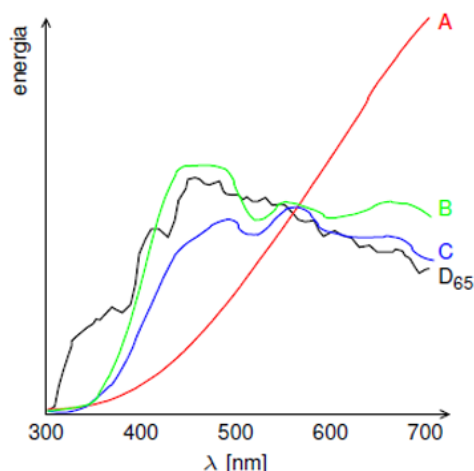


Figura 11: Distribución espectral normalizada de cuatro de los iluminantes patrón propuestos por la CIE.

La medida de las magnitudes radiométricas en función de la longitud de onda se realiza mediante espectrometría. Estas medidas se realizan utilizando espectroradiómetros u espectrofotómetros, que son instrumentos ópticos que cuantifican la proporción de cada longitud de onda que compone la radiación que llega hasta la entrada del instrumento dispersando la radiación incidente bien mediante un elemento prismático bien mediante un elemento difractivo. La figura 12 muestra un esquema del funcionamiento de un espectroradiómetro estándar con detector matricial.

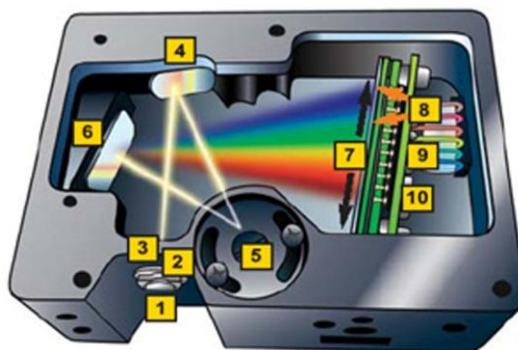


Figura 12: Esquema de funcionamiento de un espectroradiómetro de red de difracción con entrada de fibra; la luz llega hasta el instrumento y entra por la rendija de entrada (1), es colimada por el espejo primario (4) sobre una red de difracción (5) que difracta el haz incidente enviando cada longitud de onda que compone el haz incidente a un punto diferente de un espejo secundario (6) que colima cada longitud de onda del haz incidente en un fotosensor distinto de una matriz de fotodetectores (7). Fuente:

http://oceanphotonics.com/product/oceanoptics_000022.html

Las magnitudes radiométricas más utilizadas para especificar la distribución espectral de las fuentes de iluminación son la radiancia espectral y la irradiancia espectral [14]. La irradiancia espectral es el flujo radiante por unidad de área que

incide en una superficie en cada longitud de onda. Sus unidades son el $\text{W}/\text{m}^2\text{nm}$. La radiancia espectral es el flujo radiante emitido por una fuente (o superficie) por unidad de ángulo sólido (Ω) y en cada longitud de onda. El ángulo sólido bajo el que se ve una superficie desde un punto dado está definido como el “*área de la proyección cónica de la superficie sobre una esfera de radio 1 centrada en el punto*” [34]. Se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Omega = \frac{A}{R^2}, \quad (2-8)$$

donde A es el área aparente de la fuente y R es la distancia a la que se encuentra el observador. Aunque el ángulo sólido es una magnitud adimensional, el valor se expresa en estereorradianes (sr).

La práctica totalidad de las medidas espectrales realizadas durante el periodo de investigación detallado en esta tesis doctoral se han realizado sobre estímulos de color opacos y no emisores de luz, es decir, que la observación de este tipo de estímulos de color es posible gracias a la reflexión de la radiación incidente sobre los estímulos.

La reflexión de la radiación sobre un material puede ser regular (especular), si sigue las leyes de la óptica geométrica (es decir, si la radiación incidente se refleja con un ángulo igual al de incidencia), puede ser difusa, si no se encuentra una reflexión

especular o puede ser mixta, es decir, que tenga dos componentes, una componente especular y otra componente difusa [27]. Cuando un material refleja la luz de manera difusa en todas las direcciones por igual, se dice que es un difusor lambertiano (refleja la luz incidente en un punto con un ángulo sólido de 2π sr). La figura 13 muestra de manera esquemática los distintos comportamientos en cuanto a reflectancia que pueden mostrar las superficies reflectantes.



Figura 13: Esquema de los distintos tipos de reflectancia que muestran las superficies reflectantes. Fuente: Teledet

Las magnitudes espectralradiométricas más adecuadas para la caracterización espectral de este tipo de materiales son la reflectancia espectral y el factor de reflectancia. La reflectancia espectral es la fracción de flujo radiante incidente reflejado por una superficie en cada longitud de onda. El factor de reflectancia es el ratio entre el flujo radiante incidente reflejado por una superficie en una dirección determinada y el flujo radiante incidente reflejado por un blanco de referencia, irradiados ambos en condiciones idénticas. Como se ha mencionado anteriormente, la reflectancia espectral y el factor de reflectancia son parámetros

básicos para el cálculo de los valores triestímulo de los estímulos de color.

La caracterización espectral de bienes de interés cultural realizada durante el periodo de investigación que se detalla en esta tesis se ha realizado midiendo el factor de reflectancia en puntos de interés bien de los propios bienes culturales bien de muestras de distintos materiales utilizados habitualmente en su composición y restauración preparadas para poder realizar ensayos destructivos sobre ellas sin deteriorar los propios bienes.

Para conocer la distribución espectral de la radiación incidente sobre el estímulo de color que se quiere caracterizar, se realiza una medida con el espectroradiómetro con la fuente de iluminación iluminando un blanco de referencia en las mismas condiciones que se van a utilizar para realizar la medida del estímulo de color a medir. Los blancos de referencia son superficies difusoras con comportamiento lambertiano cuya reflectancia espectral está calibrada en términos absolutos y es muy lineal para todas las longitudes de onda del espectro visible. La distribución espectral incidente ($E(\lambda)$) sobre el estímulo de color se puede calcular sustituyendo los valores conocidos de reflectancia espectral del blanco patrón ($\rho_{BR}(\lambda)$) y de la función de estímulo de color relativo ($\Phi_{BR}(\lambda)$), medida por el espectroradiómetro sobre el blanco de referencia, en la ecuación (2-6). La medida realizada sobre el blanco de referencia se

utilizará para el cálculo del factor de reflectancia del material que se quiere caracterizar.

Como se explicó en el primer capítulo, uno de los factores a evitar a la hora de iluminar los bienes de interés cultural es el deslumbramiento, que es producido, entre otras cosas por los reflejos de las fuentes de iluminación sobre las superficies de los bienes iluminados. Dado que teóricamente en la iluminación de bienes de interés cultural no se verán reflejos directos sobre la superficie de los mismos, a la hora de realizar una caracterización espectral de los materiales que componen los bienes, sólo interesa la componente difusa de la reflectancia espectral. La inclusión o exclusión de la componente especular de la reflectancia espectral en las medidas espectrales depende en gran medida de la posición relativa entre la fuente de iluminación y el espectrofotómetro que se utiliza para medir, a ésta posición relativa se le llama geometría de medida.

La CIE recomienda distintas geometrías de medida en función del tipo de material que se desee caracterizar espectralmente. Las dos geometrías de medida que se han utilizado para los trabajos de caracterización espectral descritos en esta memoria son las siguientes:

- Geometría $45^\circ \times 0^\circ$: Se dice que se están realizando medidas espectrales con esta geometría cuando se ilumina el estímulo de color de manera uniforme

con un ángulo de 45° con respecto a la normal y con un ángulo acimutal de x . La componente especular de la reflectancia se evita al colocar el espectrofotómetro sobre la normal (0°).

- Geometría $45^\circ c:0^\circ$: Se diferencia de la geometría $45^\circ x:0^\circ$ en que en este caso, existen varias fuentes de iluminación colocadas a 45° , formando un anillo de fuentes de iluminación, por lo que la iluminación incide desde todos los ángulos acimutales.

Ambas geometrías sirven para medir factores de reflectancia difusos, pero la geometría anular minimiza la influencia de la estructura geométrica del estímulo de color en las medidas.

2.4.3. Espacios de representación y modelos de apariencia de color

Una vez realizados la caracterización espectral y calculados los valores triestímulo de acuerdo a los procedimientos mencionados previamente, es necesario evaluar los resultados obtenidos. Para ello, por un lado es necesario plasmar los valores colorimétricos sobre un plano en el que estén representados los distintos colores para facilitar visualmente la comprensión y análisis de los valores numéricos, por otro lado, encontrar un espacio matemático adecuado que permita relacionar los valores medidos sobre los distintos materiales que se pretenden evaluar,

ejemplos de estas relaciones son por ejemplo la evaluación de las diferencias de color entre las medidas realizadas dentro de un mismo material después de haber recibido distintas cantidades de radiación, o el estudio de la influencia de distintas fuentes de iluminación en la visualización de los bienes de interés cultural.

Como espacio de representación de los valores obtenidos tras los cálculos de los valores triestímulo, en 1931 se comenzó a utilizar el diagrama de cromaticidad CIE x, y . Para representar los valores sobre el diagrama, es necesario calcular las coordenadas cromáticas (x, y, z) a partir de los valores triestímulo (X, Y, Z).

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad (2-9)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad (2-10)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}, \quad (2-11)$$

donde $x + y + z = 1$.

Como muestra la figura 14, el diagrama cromático CIE x, y de 1931 queda delimitado por la representación en un espacio rectangular de las coordenadas cromáticas de los estímulos de color monocromáticos.

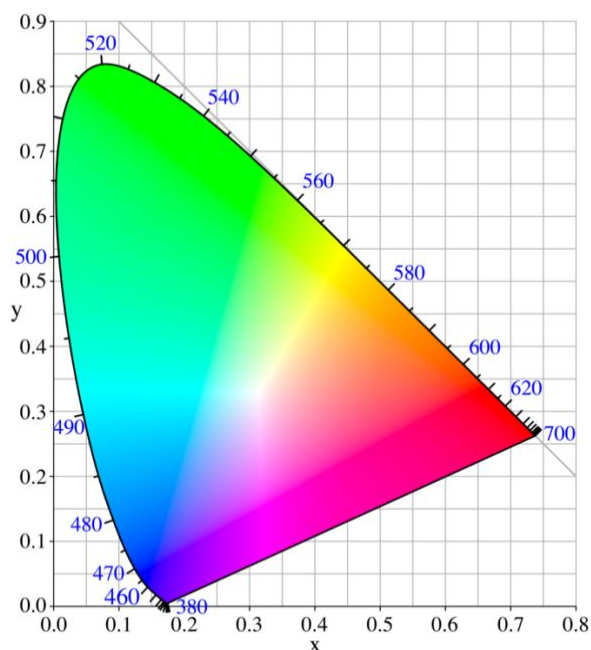


Figura 14: Diagrama cromático CIE x,y de 1931. Fuente: «CIExy1931» de User:PAR - Trabajo propio. Disponible bajo la licencia Dominio público vía Wikimedia Commons <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIExy1931.png#/media/File:CIExy1931.png>

La evaluación de las diferencias cromáticas mínimamente distinguibles sobre el diagrama de cromaticidad CIE x, y de 1931 mostró la dificultad de evaluar dichas diferencias al no ser uniformes en todo el diagrama. El discutido trabajo de David Macadam sobre las diferencias cromáticas mínimamente distinguibles en el diagrama cromático CIE x, y de 1931 [35], [36] mostraba, aproximando los valores a elipses, este problema que se muestra en la figura 15.

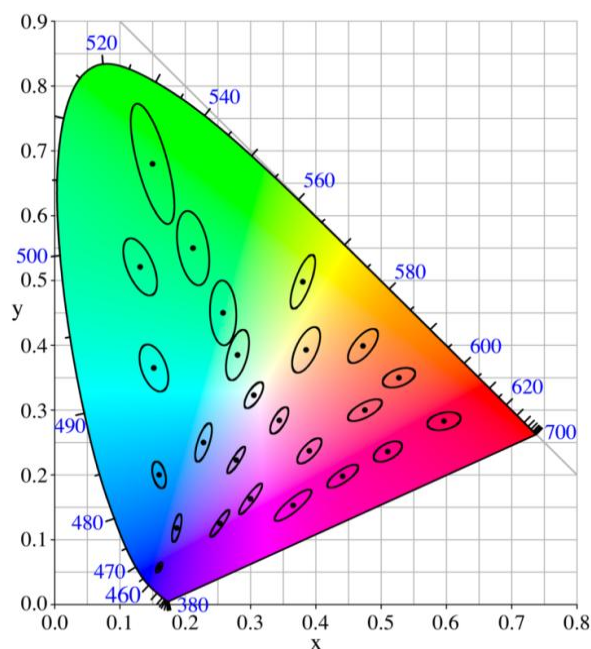


Figura 15: Diagrama cromático CIE x, y de 1931 sobre el que se han representado las elipses aproximadas por MacAdam que representa 10 veces el valor de diferencia cromática mínimamente diferenciable en cada región del diagrama cromático.

Fuente: "CIExy1931 MacAdam". Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIExy1931_MacAdam.png#/media/File:CIExy1931_MacAdam.png

Debido a esta falta de uniformidad, se han ido proponiendo distintas conversiones sobre el diagrama cromático CIE x, y para conseguir un espacio de color uniforme. Durante el periodo de investigación que se resume en esta tesis, se ha utilizado el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$, propuesto por la CIE en 1976 como espacio de coordenadas para describir los colores. Se ha elegido este espacio de color en primer lugar, por ser un espacio de color tridimensional, uniforme y en el que la evaluación de las diferencias cromáticas es sencilla y está ampliamente estudiada. En segundo lugar se ha elegido este

espacio de color por ser el más utilizado habitualmente en el campo de la evaluación de color de bienes culturales, de modo que es el que mayor facilidad de interpretación permitía a la hora de mostrar resultados a personas relacionadas con los bienes de interés cultural no familiarizadas con la colorimetría.

El espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ queda definido por las siguientes ecuaciones [27]:

$$L^* = 116f \frac{Y}{Y_n} - 16, \quad (2-12)$$

$$a^* = 500(f \frac{X}{X_n} - f \frac{Y}{Y_n}), \quad (2-13)$$

$$b^* = 200(f \frac{Y}{Y_n} - f \frac{Z}{Z_n}), \quad (2-14)$$

donde:

$$f \frac{X}{X_n} = \sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} \leftrightarrow \frac{X}{X_n} > (\frac{24}{116})^3, \quad (2-15)$$

$$f \frac{X}{X_n} = \frac{841}{108} \frac{X}{X_n} + \frac{16}{116} \leftrightarrow \frac{X}{X_n} \leq (\frac{24}{116})^3, \quad (2-16)$$

y

$$f \frac{Y}{Y_n} = \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \leftrightarrow \frac{Y}{Y_n} > (\frac{24}{116})^3, \quad (2-17)$$

$$f \frac{Y}{Y_n} = \frac{841}{108} \frac{Y}{Y_n} + \frac{16}{116} \leftrightarrow \frac{Y}{Y_n} \leq (\frac{24}{116})^3, \quad (2-18)$$

donde X, Y, Z son los valores triestímulo considerados y X_n, Y_n, Z_n son los valores triestímulo de un estímulo de color blanco (en general se suelen utilizar los valores triestímulo de la fuente

utilizada para los cálculos, considerando que ésta es reflejada por un blanco de referencia perfecto y normalizando Y_n a 100).

En el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$, la coordenada L^* indica la luminosidad aparente del estímulo de color, la coordenada a^* señala el eje de los colores rojo ($+a^*$) y verde ($-a^*$) y la coordenada b^* señala el eje de los colores amarillo ($+b^*$) y azul ($-b^*$).

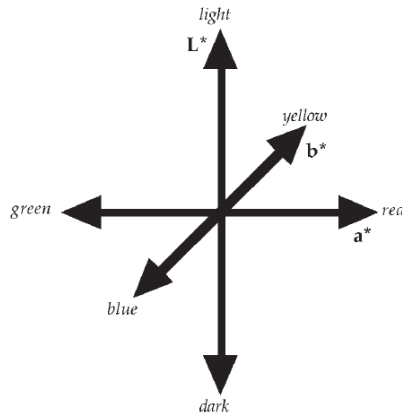


Figura 16: Visualización tridimensional del espacio de color CIE $L^*a^*b^*$. Fuente: Fairchild [14].

Al trabajar sobre la proyección cilíndrica de los ejes cartesianos a^* y b^* , se definen los parámetros de croma ($C_{a^*b^*}$) y tono (h_{ab}).

$$C_{a^*b^*} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}, \quad (2-19)$$

$$h_{ab} = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right), \quad (2-20)$$

La diferencia de color ($\Delta E_{a^*b^*}$) entre dos estímulos de color del mismo tamaño y la misma forma, en éste espacio de color, se corresponde con la distancia euclídea entre las coordenadas cromáticas L^* , a^* y b^* de los dos estímulos de color.

$$\Delta E_{a^*b^*} = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} . \quad (2-21)$$

La diferencia de color entre dos estímulos mínimamente percibida varía entre unos estudios y otros, para la evaluación de los estímulos de color utilizados en los trabajos que se detallan en esta memoria, se va a tomar como valor mínimamente distinguible $\Delta E_{a^*b^*} \geq 3$ [27].

Para poder evaluar la percepción de los estímulos de color en las condiciones de observación de una manera más fiel a la realidad del sistema visual humano, se ha utilizado el Modelo de Apariencia de Color CIECAM02 [37] para el análisis de los resultados en uno de los casos de aplicación que mostramos a continuación. La CIE define Modelo de Apariencia de Color (CAM por sus siglas en inglés) como *“cualquier modelo que incluya predicciones de al menos los atributos de color relativos de Luminosidad, Croma y Tono”* [14]. Para que un modelo incluya predicciones razonables de estos atributos, debe incluir por lo menos algún modelo de transformación para estimar la Adaptación Cromática en función de las condiciones de observación.

Aunque siguiendo esta definición el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ puede considerarse un CAM, dado que incluye una estimación de la adaptación cromática sencilla y es capaz de predecir luminosidad, croma y tono, éste espacio de color presenta unas limitaciones que lo hacen mejorable a la hora de utilizarlos como CAM. En primer lugar, el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ no presenta una dependencia de las coordenadas cromáticas con el nivel de luminancia, y esto aleja sus predicciones del comportamiento real del sistema visual humano. En segundo lugar, no tiene en cuenta la influencia ni del fondo ni del entorno en que se muestra el estímulo visual, por lo que en este sentido también está alejado de la percepción real del estímulo, por último, tampoco permite la estimación del brillo y el colorido [14].

El modelo CIECAM02 parte de los valores triestímulo del estímulo de color (X, Y, Z) y de un punto blanco iluminado con el iluminante deseado (X_w, Y_w, Z_w) calculados para el iluminante patrón CIE de 2°. Es necesario también conocer la luminancia adaptativa (L_A) en cd/m^2 , que se suele corresponder con el 20% del valor de la luminancia de un objeto blanco en la escena. También es necesario definir la luminancia relativa del entorno como “*dark, dim o average*” en función de la naturaleza del estímulo de color, y definir si se descuenta o no el iluminante de los cálculos. El parámetro habitual en la visualización de estímulos de color no emisores de luz es “*average*” para la luminancia

relativa del entorno y se suele descontar el iluminante. Una vez establecida la luminancia relativa del entorno, se seleccionan los valores de la no linealidad exponencial (c), el factor de inducción cromática (N_c) y el máximo grado de adaptación (F) que se muestran en la tabla 3 [14].

Visualización entorno	c	N_c	F
Average surround	0.69	1.0	1.0
Dim surround	0.59	0.9	0.9
Dark surround	0.525	0.8	0.8

Tabla 3: Parámetros de entrada para CIECAM02 en función del entorno [14].

El modelo de adaptación cromática que utiliza CIECAM02 es una transformación lineal que facilita los cálculos, haciendo del modelo CIECAM02 un modelo más sencillo que otros CAM manteniendo la bondad de sus predicciones. Para calcular las respuestas triestímulo (R , G , y B) de los valores triestímulo de entrada se utiliza la matriz de Transformación de Adaptación Cromática (M_{CAT02}).

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{CAT02} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (2-22)$$

$$\begin{bmatrix} R_W \\ G_W \\ B_W \end{bmatrix} = M_{CAT02} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix}, \quad (2-23)$$

donde:

$$M_{CAT02} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix}. \quad (2-24)$$

El grado de adaptación (D) se calcula a partir de la luminancia adaptativa y el máximo grado de adaptación.

$$D = F \left[1 - \left(\frac{1}{3.6} \right) e^{\left(\frac{-(L_A + 42)}{92} \right)} \right], \quad (2-25)$$

Una vez definido el grado de adaptación, las respuestas triestímulo adaptadas del estímulo de color (R_C , G_C y B_C) y del blanco de referencia (R_{Cw} , G_{Cw} y B_{Cw}) quedan definidas de la siguiente manera:

$$R_C = \left[\left(\frac{Y_W D}{R_W} \right) + (1 - D) \right] R, \quad (2-26)$$

$$G_C = \left[\left(\frac{Y_W D}{G_W} \right) + (1 - D) \right] G, \quad (2-27)$$

$$B_C = \left[\left(\frac{Y_W D}{B_W} \right) + (1 - D) \right] B, \quad (2-28)$$

$$R_{Cw} = \left[\left(\frac{Y_W D}{R_W} \right) + (1 - D) \right] R_w, \quad (2-29)$$

$$G_{Cw} = \left[\left(\frac{Y_W D}{G_W} \right) + (1 - D) \right] G_w, \quad (2-30)$$

$$B_{Cw} = \left[\left(\frac{Y_W D}{B_W} \right) + (1 - D) \right] B_w, \quad (2-31)$$

A continuación definen algunos componentes dependientes de las condiciones de visión necesarios para proseguir con los cálculos de los atributos de color predichos por

el modelo, como son el Factor de adaptación al nivel de luminancia (F_L), los factores de inducción (N_{bb} y N_{cb}) y la base exponencial de no linealidad (z), dependientes estos últimos factores de la luminancia relativa del fondo (Y_b).

$$F_L = 0.2k^4(5L_A) + 0.1(1 - k^4)^2(5L_A)^{1/3}, \quad (2-32)$$

donde

$$k = \frac{1}{5L_A + 1}, \quad (2-33)$$

y

$$N_{bb} = N_{cb} = 0.725 \left(\frac{1}{n} \right)^{1/5}. \quad (2-34)$$

$$z = 1.48 + \sqrt{n}, \quad (2-35)$$

donde

$$n = \frac{Y_b}{Y_W}. \quad (2-36)$$

El siguiente paso en el cálculo de los parámetros que definen el modelo CIECAM02 es convertir las respuestas triestímulo adaptadas para el estímulo de color (R_C , G_C y B_C) y el blanco de referencia (R_{Cw} , G_{Cw} y B_{Cw}), desde el modelo de transformación de color MCAT02 en el que se habían calculado

hasta otro modelo más próximo a las respuestas reales de los conos. Esto se realiza por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = M_{HPE} M_{CAT02}^{-1} \begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix}, \quad (2-37)$$

$$\begin{bmatrix} R'_w \\ G'_w \\ B'_w \end{bmatrix} = M_{HPE} M_{CAT02}^{-1} \begin{bmatrix} R_{Cw} \\ G_{Cw} \\ B_{Cw} \end{bmatrix}, \quad (2-38)$$

donde

$$M_{HPE} = \begin{bmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.00000 & 0.00000 & 1.00000 \end{bmatrix}, \quad (2-39)$$

$$M_{CAT02}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.096124 & -0.278869 & 0.182745 \\ 0.454369 & 0.473533 & 0.072098 \\ -0.009628 & -0.005698 & 1.015326 \end{bmatrix}. \quad (2-40)$$

Una vez convertidas, se calculan las no linealidades de post adaptación tanto para el estímulo de color (R'_a , G'_a y B'_a) como para el blanco de referencia (R'_{aw} , G'_{aw} y B'_{aw}), que servirán para el cálculo de las dimensiones oponentes de color.

$$R'_a = \frac{400(F_L R' / 100)^{0.42}}{27.13 + (F_L R' / 100)^{0.42}} + 0.1, \quad (2-41)$$

$$G'_a = \frac{400(F_L G' / 100)^{0.42}}{27.13 + (F_L G' / 100)^{0.42}} + 0.1, \quad (2-42)$$

$$B'_a = \frac{400(F_L B' / 100)^{0.42}}{27.13 + (F_L B' / 100)^{0.42}} + 0.1, \quad (2-43)$$

$$R'_{aw} = \frac{400(F_L R'_w/100)^{0.42}}{27.13 + (F_L R'_w/100)^{0.42}} + 0.1, \quad (2-44)$$

$$G'_{aw} = \frac{400(F_L G'_w/100)^{0.42}}{27.13 + (F_L G'_w/100)^{0.42}} + 0.1, \quad (2-45)$$

$$B'_{aw} = \frac{400(F_L B'_w/100)^{0.42}}{27.13 + (F_L B'_w/100)^{0.42}} + 0.1. \quad (2-46)$$

De modo que las dimensiones oponentes de color quedan definidas por:

$$a = R'_a - \frac{12G'_a}{11} + \frac{B'_a}{11}, \quad (2-47)$$

$$b = \frac{1}{9}(R'_a + G'_a - 2B'_a). \quad (2-48)$$

Una vez realizados los cálculos previos, se calculan las correlaciones de apariencia, que son el tono (h), la luminosidad (J), el brillo (Q), el croma (C), el colorido (M) y la saturación (s). La apariencia de un estímulo de color queda perfectamente definida por al menos cinco de éstas correlaciones.

El tono (h) del estímulo de color queda definido por la siguiente ecuación:

$$h = \tan^{-1} \frac{b}{a}. \quad (2-49)$$

El factor de excentricidad del tono (e_t), necesario para calcular el croma se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$e_t = \frac{1}{4} \left[\cos \left(h \frac{\pi}{180} + 2 \right) + 3.8 \right]. \quad (2-50)$$

Las respuestas acromáticas tanto para el estímulo de color (A) como para el blanco de referencia (A_w) se calculan de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$A = \left[2R'_a + G'_a + \frac{1}{20}B'_a - 0.305 \right] N_{bb} , \quad (2-51)$$

$$A_w = \left[2R'_{aw} + G'_{aw} + \frac{1}{20}B'_{aw} - 0.305 \right] N_{bb} . \quad (2-52)$$

La luminosidad (J), definida como el brillo aparente del estímulo en relación a otro estímulo blanco que se observa en las mismas condiciones de visualización, queda definida por la siguiente ecuación:

$$J = 100 \left(\frac{A}{A_w} \right)^{cz} . \quad (2-53)$$

El brillo (Q), que da una idea de la cantidad de luz proveniente del objeto que es percibida, queda definido por la ecuación (2-54):

$$Q = \frac{4}{c} \sqrt{\frac{J}{100}} (A_w + 4) F_L^{0.25} . \quad (2-54)$$

Previo al cálculo del croma (C) es necesario calcular el factor temporal (t) relacionado con la saturación y con los factores de inducción cromática del entorno (N_c) y del fondo (N_{cb}):

$$t = \frac{(50000/13)N_cN_{cb}e_t\sqrt{a^2+b^2}}{R'_a+G'_a+\left(\frac{21}{20}\right)B'_a} . \quad (2-55)$$

El croma (C), definido como la cantidad de color de un estímulo de color en comparación con el brillo de un estímulo blanco observado en las mismas condiciones de visualización, queda entonces definido en la ecuación (2-56):

$$C = t^{0.9} \sqrt{\frac{J}{100}} (1.64 - 0.29\pi)^{0.73}. \quad (2-56)$$

El colorido (M), que define la cantidad de tono contenido en un estímulo (cuanto difiere el estímulo de color de un gris), queda definido en la ecuación (2-57):

$$M = CF_L^{0.25}. \quad (2-57)$$

La saturación (s), que da una idea del colorido de un estímulo en relación con su propio brillo, queda definida en la ecuación (2-58):

$$s = 100 \sqrt{\frac{M}{Q}}. \quad (2-58)$$

*“El verdadero color de una cosa aparecerá
en su parte no afectada por ninguna
clase de sombra ni de brillo”*

Leonardo da Vinci

3. Caracterización espectral y colorimétrica. Casos de aplicación

Una vez presentados los procedimientos necesarios para la evaluación espectral y colorimétrica de obras de arte, se han seleccionado, para presentar en esta memoria de tesis, dos casos de aplicación de la metodología previamente descrita entre los diversos trabajos de investigación que se han realizado durante el periodo de investigación de este doctorado.

3.1. Caracterización de la obra “Guernica” de Pablo Picasso

La obra “*Guernica*” de Pablo Picasso es una de sus obras más emblemáticas, fue completada en junio de 1937 como respuesta al bombardeo del pueblo de Guernica, en abril del mismo año, por parte del ejército alemán durante la guerra civil española. El propósito del pintor con su obra fue centrar la atención del mundo sobre las atrocidades cometidas durante la guerra. La obra fue realizada por encargo del gobierno español para colocar en el pabellón de España en la Exposición Universal de París, en 1937. El cuadro se ha convertido desde entonces en un símbolo universal del sufrimiento producido por las guerras y es una imagen habitual de los movimientos antibelicistas. La obra se encuentra actualmente expuesta en el Centro Nacional Museo de Arte Reina Sofía (CNMARS).

La particularidad del trabajo realizado se debe, en primer lugar a la dificultad que entraña trabajar sobre una obra de gran tamaño (3.5x7.8 m) y en segundo lugar, a la necesidad de generar una base de datos que permita conocer la evolución del estado de conservación de la obra comparando las medidas recogidas durante este trabajo con las recogidas en trabajos futuros.

El uso de la espectrometría en el ámbito museístico ha tenido una gran relevancia en los últimos años. La identificación de pigmentos [38], el análisis de resultados de procesos de restauración [39] o la evaluación de la idoneidad de distintas técnicas de restauración sobre probetas [40] como trabajo previo a la restauración, han sido algunas de las múltiples aplicaciones que ha tenido esta técnica. El procedimiento habitual consiste en el registro punto a punto de las reflectancias espectrales en zonas de especial interés, utilizando espectrofotómetros sin contacto.

Las técnicas más extendidas hoy en día para la estimación de la reflectancia espectral de obras de arte son las basadas en el análisis de imágenes hiperespectrales [41], que permiten el registro de un gran número de puntos a la vez. La información espectral se consigue tomando varias imágenes a través de filtros de transmitancia conocida [42, 43]. Desafortunadamente, estas técnicas no permiten aún medidas lo suficientemente precisas para detectar las pequeñas variaciones espectrales que pueda sufrir una pintura debido a su evolución natural en las condiciones de exposición en un museo [44].

El caso de estudio que se describe consiste en la realización de una caracterización espectral precisa de la obra midiendo el factor de reflectancia en una matriz de puntos distribuida uniformemente sobre la obra. Las medidas y el posterior análisis de los datos permiten generar una base de datos para poder estimar la evolución de la obra en futuras medidas [45].

3.1.1. Configuración del sistema de medida

El trabajo de caracterización espectral de la obra se realizó midiendo una matriz rectangular de 71 x 31 puntos, con una distancia de separación mínima de 100 mm entre ellos, debido a la imposibilidad de interrumpir la exposición de la obra dada su importancia, el tiempo disponible para realizar la caracterización era muy limitado, siempre fuera del horario de apertura al público del museo. A causa de las limitaciones temporales, la gran cantidad de medidas necesarias, así como las dificultades logísticas de las medidas, se realizó únicamente una serie de medidas sobre la matriz rectangular.

Para llevar a cabo la caracterización espectral de la obra se utilizó un sistema de medida automatizado que estaba compuesto por un sistema de medida del factor de reflectancia sin contacto (formado por un espectroradiómetro, una fuente de iluminación, un sistema de registro de imágenes y una unidad informatizada de control), y un sistema de posicionamiento en tres ejes de alta precisión (que incluye un robot cartesiano con

tres ejes de desplazamiento, un telémetro LASER para determinar la distancia a la superficie de medida del eje Z y una unidad informatizada de control). La figura 17 muestra un dibujo del sistema descrito.

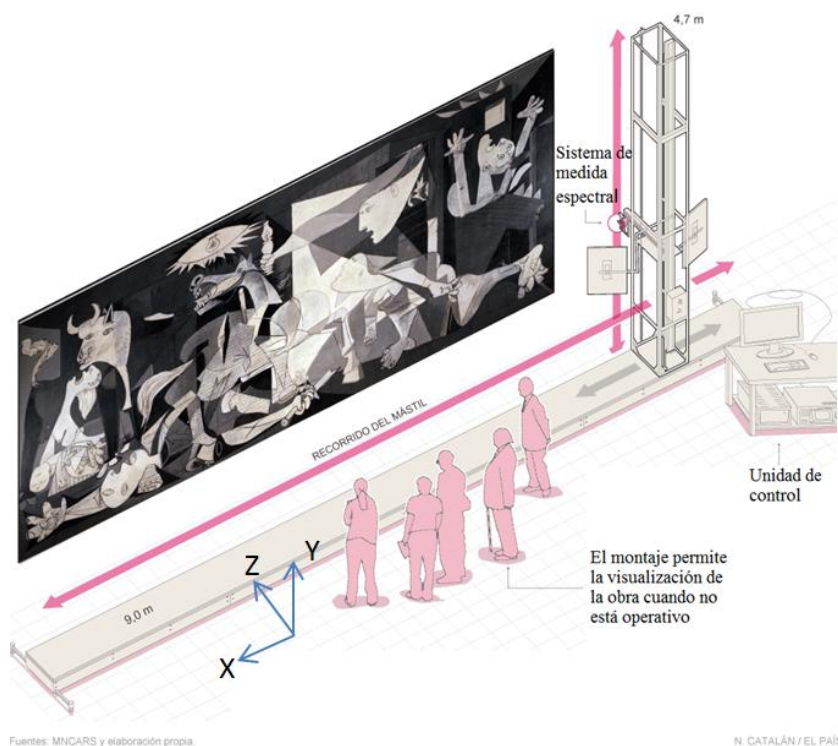


Figura 17: Dibujo del sistema de medida automatizado que se utilizó. Fuente: N. Catalán con modificaciones [46].

El sistema de medida del factor de reflectancia contaba con un espectralradiómetro de la casa Photo Research modelo PR655 con un objetivo tipo MS-75, que realizó las medidas espectrales en el rango de 400 nm a 780 nm con un intervalo de 4 nm. La distancia desde el espectralradiómetro al plano en el que se encontraba el estímulo de color fue de 570mm, el objetivo MS-

75 en estas condiciones de medida tomaba el espectro en áreas circulares de 5.5 mm de diámetro. La distancia de trabajo estaba limitada debido a la configuración obligada del sistema para la implementación de otros equipos de medida.

Con el objeto de minimizar la influencia de la textura de la pintura en las medidas espectrales se trató de seguir la recomendación de la CIE [32] buscando una geometría de medida lo más próxima posible a la geometría $45^\circ\text{c}:0^\circ$, aunque debido a las restricciones mecánicas del sistema de posicionamiento la geometría de medida fue finalmente $35^\circ\text{c}:0^\circ$. El sistema de iluminación se desarrolló específicamente para el caso de estudio. Se diseñó en forma de anillo, con 250 mm de diámetro. El sistema cuenta con doce fuentes de iluminación repartidas de manera uniforme por toda la circunferencia del anillo. Para evitar la incidencia de radiación directa sobre el objetivo del espectroradiómetro se apantalló el sistema de iluminación con un diafragma opaco en forma de anillo, el eje del espectroradiómetro atravesaba el centro del anillo. La figura 19 a muestra el aspecto del sistema de iluminación.

Para que el espectro de emisión del sistema de iluminación cubriera adecuadamente todo el rango de medida del espectro se utilizaron dos tipos de fuentes de iluminación. Por un lado se utilizaron ocho LEDs blancos que cubrían el espectro entre 400 nm y 650 nm, por otro lado se utilizaron cuatro lámparas halógenas de baja potencia que cubrían el espectro en las

longitudes de onda más largas (en el entorno de 780 nm). Todas las fuentes de iluminación fueron alimentadas en corriente continua para maximizar la estabilidad temporal. La figura 18 muestra la distribución espectral del sistema de iluminación desarrollado.

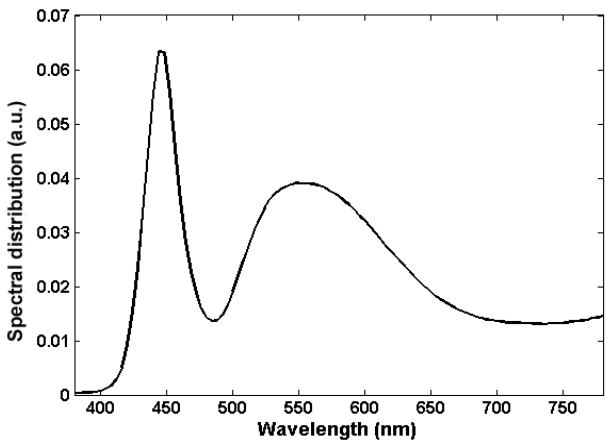


Figura 18: Distribución espectral del sistema de iluminación desarrollado para la medida del factor de reflectancia.

La medida del blanco de referencia para el cálculo del factor de reflectancia se realizó utilizando un blanco calibrado con un 99% de reflectancia de la casa LabSphere modelo SRS99. Las medidas sobre el blanco se repitieron de manera periódica un total de 71 veces para tener en cuenta la influencia de las variaciones temporales de las fuentes de iluminación en las medidas del factor de reflectancia.

El sistema de iluminación se colocó a una distancia fija de 178 mm de la superficie de la obra, de modo que el ángulo formado entre la luz incidente y el eje del espectroradiómetro fue

35°. La figura 19 muestra el aspecto de la fuente de iluminación, individualmente y una vez configurado el sistema de medida.

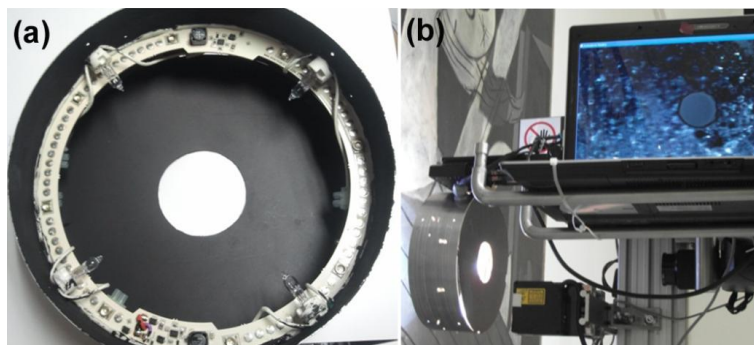


Figura 19: Sistema de iluminación diseñado. En la parte izquierda de la figura (a) se pueden apreciar los dos tipos de fuentes utilizadas. La parte derecha de la figura (b) muestra el sistema de medida desarrollado en funcionamiento.

Para poder llevar a cabo las medidas de una manera automática y repetible en trabajos futuros de evaluación de la evolución de la obra, se desarrolló un sistema de posicionamiento con tres ejes de desplazamiento y una precisión de movimiento de 25 μm , que se muestra en la figura 17.

Para compensar las variaciones en la planitud de la pintura y mantener constante la distancia entre el sistema de medida espectral y la superficie de la obra, previamente a la realización de las medidas, se llevó a cabo una caracterización topográfica de la pintura con respecto al plano de desplazamiento del robot utilizando el telémetro LASER incorporado en el sistema de posicionamiento. Esta caracterización puso de manifiesto que existía, además de las deformaciones locales debidas a la propia colocación del cuadro, una deformación global de la obra que

seguía el patrón de la estructura del bastidor sobre el que está colocada la pintura. La figura 20 muestra la topografía realizada de la obra sobre la que se ha superpuesto una imagen de la obra para facilitar el reconocimiento de cada zona.

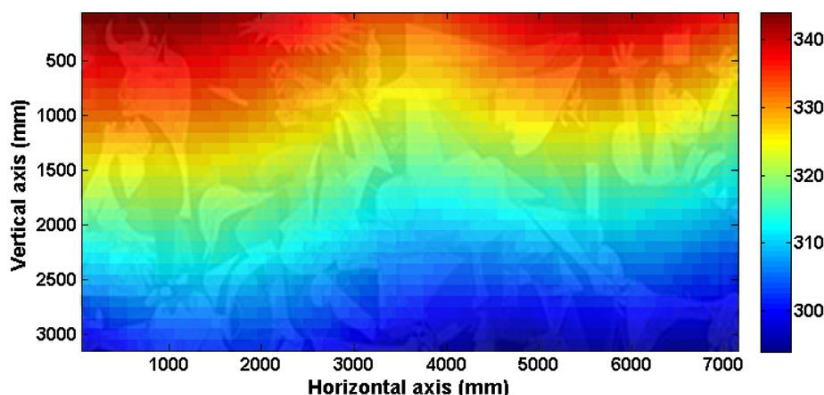


Figura 20: Topografía medida sobre la obra tomando como referencia de plano el sistema de posicionamiento. El mapa de color identifica la distancia en mm medida desde el sistema de posicionamiento.

Aunque el empleo del robot permitía el posicionamiento con una alta precisión y repetitividad, el movimiento natural del cuadro podría hacer que una misma coordenada no coincidiese con un mismo punto del cuadro en dos tiempos diferentes, por este motivo se ha implementado un sistema que permite tomar la imagen del área de medida real.

El sistema implementado consta de un sensor CCD de la casa The Imaging Source modelo DFK41BU02 con un objetivo de 25mm de focal adaptado sobre el ocular del espectroradiómetro. De ésta forma, cuando en un futuro se repita la caracterización espectral existirá un doble registro de la posición de las medidas

que asegure que la comparación realizada es precisa, evitando así posibles desviaciones en las áreas medidas fruto de dilataciones, estrés o cualquier otro factor que pueda alterar la geometría de la obra. La figura 21 muestra una de las imágenes adquiridas a través del ocular del espectroradiómetro. El círculo negro indica el área exacta sobre la que se midió.



Figura 21: Imagen del punto de medida tomada por el sensor CCD acoplado en el ocular del espectroradiómetro.

Para comprobar la precisión del sistema de caracterización espectral se llevó a cabo una calibración colorimétrica del sistema utilizando el Colorchecker GretaMacbeth de 24 parches de la marca X-Rite. Tras la medida del factor de reflectancia en un punto de cada parche se calcularon las coordenadas cromáticas de las medidas en el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ para el Observador patrón CIE de 2° y el iluminante estándar D50. Los resultados fueron comparados con los datos suministrados por el fabricante encontrándose una diferencia de color ($\Delta E_{a^*b^*}$) media de 1.16 unidades, una cantidad imperceptible por el ojo humano, que se considera que no es capaz de distinguir una cantidad inferior a 3 unidades [14].

3.1.2. Análisis de resultados

El análisis de los datos medidos se ha llevado a cabo en tres pasos: Por un lado se realizó un análisis por componentes principales de los factores de reflectancia medidos para poder realizar una comparación global en medidas futuras [47], un segundo análisis del factor de reflectancia en función del nivel de gris de la zona medida ha permitido encontrar una tendencia en el factor de reflectancia para las zonas más claras de la obra, por último se ha realizado un análisis colorimétrico de los cambios en la reflectancia utilizando el modelos de apariencia de color CIECAM02.

3.1.2.1. Análisis por componentes principales (PCA)

Los datos obtenidos tras el proceso de medida pueden ser vistos como una imagen multiespectral obtenida al medir el factor de reflectancia en una colección de puntos repartidos uniformemente en una rejilla rectangular de periodo vertical $\Delta\xi$ y periodo horizontal $\Delta\eta$. Estos puntos podrían ser identificados por sus coordenadas:

$$(\xi_{i,j}, \eta_{i,j}) = (\xi_0, \eta_0) + ((i-1)\Delta\xi, (j-1)\Delta\eta), \quad (3-1)$$

donde i toma valores desde 1 a N_ξ , y j desde 1 a N_η .

También cada longitud de onda en la que se ha medido (λ_m) puede ser expresada en función del rango de medida:

$$\lambda_m = \lambda_0 + (m - 1)\Delta\lambda, \quad (3-2)$$

donde m toma valores entre 1 y M , siendo M el número de muestras espectrales medidas.

Teniendo esta notación, es posible expresar un dato (S) en función de sus coordenadas y la longitud de onda deseada como $S(\xi_{i,j}, \eta_{i,j}, \lambda_m)$, en el caso de las medidas tomadas, $N_\xi=71$, $N_\eta=31$, $\lambda_0=380$ nm, $M=100$ y $\Delta\lambda = 4$ nm.

Para poder aplicar el análisis de componentes principales es necesario redimensionar los datos como una matriz rectangular N filas y M columnas, de modo que se preserve la información sobre la posición de los puntos. Para ello asignamos un índice (n) que identifique cada pareja de puntos (i, j) , de modo que la localización espacial de cada punto quedará identificada de la siguiente manera:

$$(\xi_{i,j}; \eta_{i,j}) = (\xi_n; \eta_n). \quad (3-3)$$

De esta forma cada fila contiene el factor de reflectancia obtenido en un punto dado de la pintura. Cada columna de la nueva matriz contiene una imagen de la pintura a una longitud de onda dada.

La descomposición del análisis PCA dará como resultado una colección de autovalores (α), autovectores (v) y componentes principales (PC) que tendrá la siguiente forma:

$$S_{\xi_n, \eta_n, \lambda_m} = A(\lambda_m) + \sum_{\alpha=1}^N v_{\alpha}(\lambda_m) PC_{\alpha}(\xi_n, \eta_n), \quad (3-4)$$

donde $A(\lambda_m)$ es la imagen promediada de cada intervalo espectral.

$$A(\lambda_m) = \langle S(x_n, y_n, \lambda_m) \rangle_{(\xi_n, \eta_n)}. \quad (3-5)$$

Como muestra la ecuación (3-4), el análisis por componentes principales permite diferenciar las coordenadas espaciales y las espectrales, las componentes principales (PC_{α}) son mapas del cuadro que explican en orden decreciente con su índice (α) la covarianza de los datos originales.

La importancia de cada una de las componentes principales, medida por su autovalor, se muestra en la figura 22. Nótese que los cinco primeros autovalores aparecen con símbolos rellenos, esto se debe a que son distinguidos como independientes según el criterio establecido en la bibliografía [48]. Entre las 5 primeras componentes principales explican el 99.97% de la covarianza.

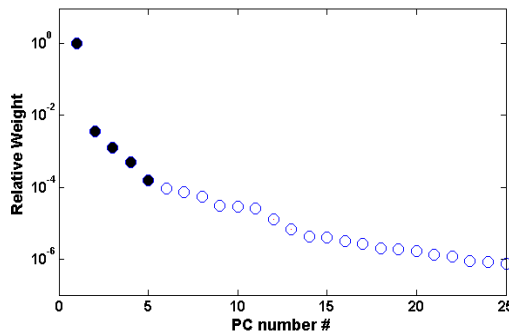


Figura 22: Autovalores de cada una de las componentes principales obtenidas.

La distribución espectral de los autovectores de cada una de las cinco primeras componentes principales se muestran en la figura 23, conviene recordar que el significado de cada valor de los autovectores es la contribución de la componente principal a la imagen en una longitud de onda dada.

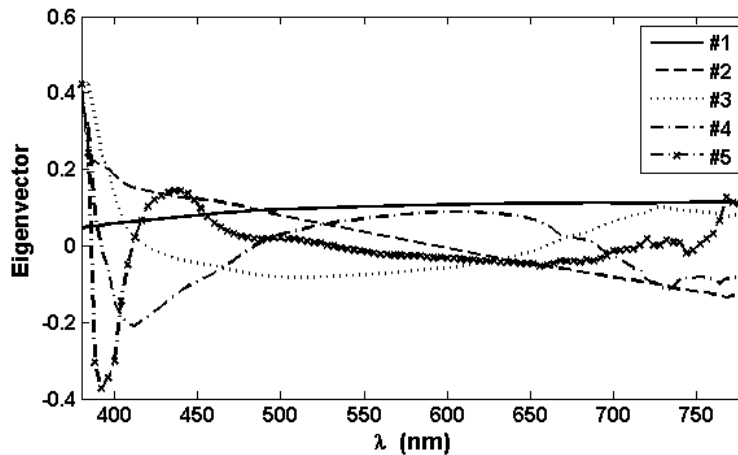


Figura 23: Autovectores de las cinco primeras componentes calculadas, que contienen el 99.97% de la información de la covarianza de los factores de reflectancia.

Como se puede apreciar, el valor del autovector de la primera componente principal, que contiene el 99.41% de la información sobre la covarianza del factor de reflectancia, es más o menos constante para todas las longitudes de onda estudiadas, algo esperable dado que se trata de un cuadro pintado en escala de grises.

La distribución espacial dada por cada componente principal aporta también información importante que podrá ser aplicada en medidas futuras para evaluar la calidad de las medidas.

3.1.2.2. Análisis del factor de reflectancia

Dado que la obra estudiada es un cuadro en niveles de gris, el siguiente análisis, se ha realizado estudiando el factor de reflectancia y cómo esta variable puede estar relacionada con posibles desplazamientos cromáticos.

Se ha realizado un análisis del factor de reflectancia en función del valor medio de reflectancia ($\bar{\rho}$) para encontrar un patrón de comportamiento común.

La figura 24 muestra los valores medios de los factores de reflectancia medidos. La imagen está superpuesta con una imagen real de la obra para facilitar la localización de las medidas sobre la obra.

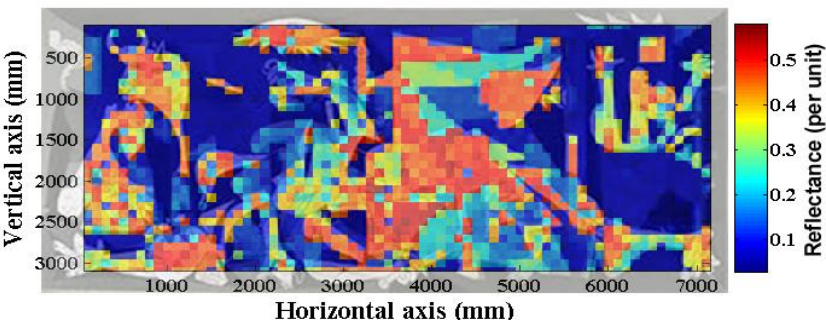


Figura 24: Valores de factor de reflectancia medio en cada uno de los puntos medidos.

Los valores de reflectancia medios van desde los más oscuros (factor de reflectancia en el entorno de 0.02 por uno hasta los grises moderadamente claros (valores en torno a 0.62 por uno). Las zonas más oscuras predominan en la obra. La figura 25 muestra un histograma de los factores de reflectancia medios,

se puede observar como hay alrededor de 500 medidas con un factor de reflectancia medio de 0.09 (± 0.015) por uno.

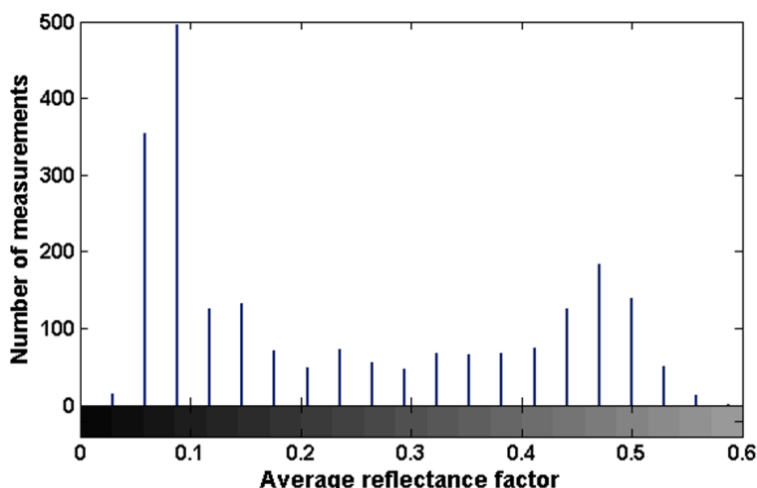


Figura 25: Histograma de los valores medios de factor de reflectancia.

El análisis de los factores de reflectancia se llevó a cabo agrupando las medidas en función de su factor de reflectancia medio en 19 intervalos centrados cada 0.03 por uno (los valores en los que se agrupó se corresponden con los picos en la figura 25).

Los factores de reflectancia que se espera encontrar en una obra predominantemente en escala de grises son aproximadamente iguales para todas las longitudes de onda. En el caso del “Guernica” se ha encontrado una desviación no lineal que aumenta al aumentar el factor de reflectancia que se muestra en la figura 26.

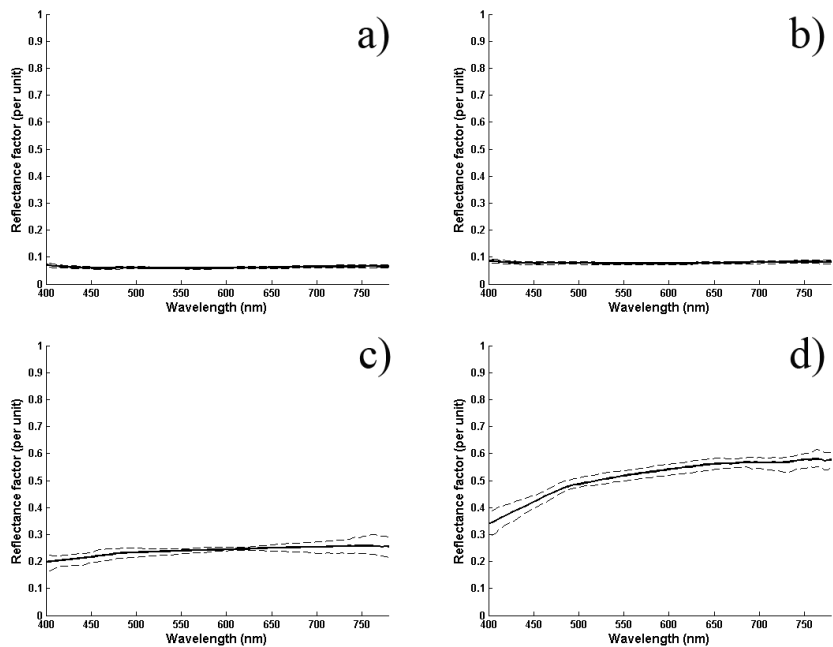


Figura 26: Factores de reflectancia promedio (línea continua) y curvas de percentil 5/95 (líneas discontinuas) para cuatro de los intervalos estudiados. 0.063 por uno a), 0.079 por uno (b), 0.236 por uno (c), 0.504 por uno (d)

Además de los cambios mencionados en la distribución espectral del factor de reflectancia, se aprecia un incremento en la desviación estándar de los datos que es también mayor al incrementar el factor de reflectancia.

3.1.2.3. Análisis cromático

Para analizar el impacto de la desviación espectral que se aprecia, sobre la percepción de la obra, se ha realizado un análisis cromático sobre el modelo de apariencia de color CIECAM02, que como se ha explicado en el capítulo 2 tiene en cuenta la adaptación cromática del sujeto a las condiciones en las que se observa el estímulo de color.

Los cálculos colorimétricos se realizaron para el observador patrón CIE de 2° y para el iluminante patrón A. La iluminancia del estímulo utilizada ha sido 136 lux, que es la media de 10 medidas que se tomaron en diferentes puntos de la obra en condiciones reales de observación. Para la representación de los resultados se utilizó un espacio rectangular de coordenadas cromáticas a partir del Croma (C), el tono (h) y la luminosidad (J). Las coordenadas cromáticas a_c y b_c se calcularon según las ecuaciones (3-6) y (3-7).

$$a_c = C \cos h, \quad (3-6)$$

$$b_c = C \sin h, \quad (3-7)$$

La figura 27 muestra los valores medios de J , a_c y b_c para los 19 intervalos de reflectancia estudiados.

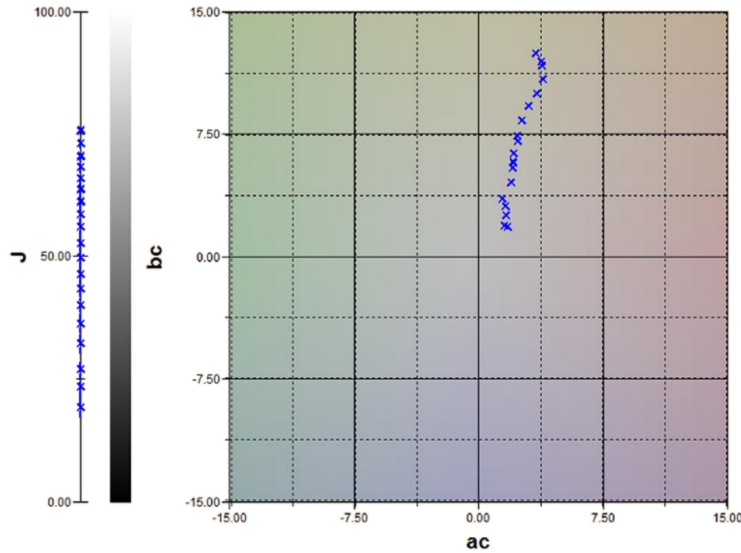


Figura 27: Coordenadas cromáticas J , a_c y b_c para los 19 intervalos estudiados.

Se ha encontrado que existe una relación entre la luminosidad de cada punto del cuadro y su cromaticidad (C y h). Más específicamente, las áreas más oscuras del cuadro tienen una cromaticidad más próxima al gris y las zonas más luminosas tienen una cromaticidad notable en la zona del rojo-amarillo, este efecto es de vital importancia a la hora de planificar la iluminación de la obra puesto que la influencia de la distribución espectral de la fuente de iluminación seleccionada será mucho más evidente sobre las zonas claras del cuadro que sobre las oscuras. El estudio de esta relación entre luminancia y cromaticidad, la cual en principio no se esperaba que fuera ligada a las pinturas originales empleadas en el cuadro, sino más bien a los diversos procesos a los que se ha visto sometido posteriormente, puede ser una herramienta de vital importancia para el control del estado de conservación del cuadro.

Para permitir calcular la relación entre la cromaticidad y el factor de reflectancia medio ($\bar{\rho}$) se ha realizado un ajuste en dos pasos. Previo al ajuste, los valores a_c y b_c fueron divididos en los 19 intervalos de estudio, de modo que los valores que se utilizaron para el ajuste fueron los valores medios.

En un primer paso, se realizó un ajuste lineal de la coordenada b_c con respecto al factor de reflectancia medio ($\bar{\rho}$), obteniéndose un coeficiente de determinación de 0.9964. La ecuación (3-8) muestra el resultado del ajuste.

$$b^* = A\bar{\rho} + B. \tag{3-8}$$

En un segundo paso, se realizó un ajuste cuadrático de los datos con un coeficiente de determinación de 0.929. La ecuación (3-9) expresa el ajuste realizado.

$$a^* = C\bar{\rho}^2 + D\bar{\rho} + E. \tag{3-9}$$

Los valores de los parámetros de las ecuaciones (3-8) y (3-9) se muestran en la tabla 4.

Parameter	Value
<i>A</i>	0.2133
<i>B</i>	0.3959
<i>C</i>	0.01158
<i>D</i>	0.07018
<i>E</i>	1.355

Tabla 4: Parámetros del ajuste en dos pasos.

La figura 27 muestra la representación de la cromaticidad en función del factor de reflectancia medio y la curva de ajuste obtenida.

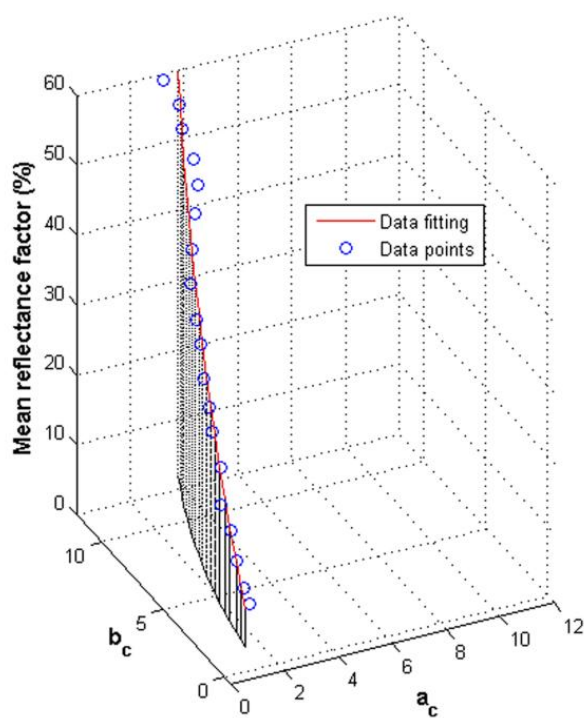


Figura 28: Ajuste de los datos que describen la variación cromática en función del factor de reflectancia medio.

3.2. Caracterización espectral y colorimétrica del proceso de restauración de la obra “*Mujer en Azul*” de Picasso

En esta sección se describe la caracterización espectral y colorimétrica de una obra emblemática del pintor Pablo Picasso. En este caso, la finalidad del trabajo es conseguir desarrollar una metodología de trabajo que permita la obtención de una medida objetiva de los resultados visuales del proceso de restauración, de modo que los restauradores puedan disponer de una nueva herramienta con la que cotejar las decisiones que precisan ir tomando durante el proceso de restauración. El trabajo se realizó en colaboración con el departamento de restauración del Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía (MNCARS).

La obra “*Mujer en Azul*” de Picasso fue pintada en 1901 cuando el pintor tenía 19 años de edad para presentarla al concurso de la Exposición Nacional de Bellas Artes, en la que no recibió ningún premio. El pintor nunca llegó a recoger la pintura y esta pasó a formar parte de los fondos públicos. La obra fue almacenada y quedó oculta hasta que en la década de 1950 fue recuperada en un estado lamentable de conservación. Es entonces cuando comienza a ser intervenida para mejorar su estado de acuerdo a los criterios de la época. Desde entonces la obra ha sufrido al menos otros tres procesos de restauración hasta la actualidad. El proceso de restauración al que ha sido sometida durante la realización de este trabajo viene motivado

por el cambio en el aspecto de la obra que ha producido la degradación de los materiales añadidos en los procesos anteriores.

La parte más visible del tratamiento que se ha realizado ha sido la eliminación de todos los estratos de materiales añadidos posteriormente a la creación de la obra (principalmente barnices), que ha conseguido recuperar las características originales de color, brillo y textura de la pintura ya que en su origen no fue barnizada por el autor. Las capas de barniz añadidas sobre la pintura original aportaban un tono amarillento a la obra debido al envejecimiento del barniz.

Dentro de los trabajos de restauración, se ha eliminado también un antiguo re entelado y ocho gruesos parches de tela, sustituyendo estos elementos de refuerzo por sistemas actuales más eficaces y menos agresivos, localizados en las zonas de desgarros de la tela original. El reverso se ha reforzado con un re-entelado “flotante” de tela semitransparente que sirve de soporte al tejido original y permite apreciar su reverso sin aplicar ningún tipo de adhesivo.

El estudio del estado de conservación de la obra y el proceso de intervención se ha apoyado en el estudio documental y en la información que proporciona el examen a través de las imágenes fotográficas obtenidas con diferentes tipos de iluminación, en los estudios por reflectografía infrarroja [49] y

radiografía, en la caracterización espectral y colorimétrica de su superficie [50], así como en la realización de los análisis químicos necesarios. Para la identificación de los materiales presentes en la obra, tanto originales como añadidos, se han empleado diferentes técnicas de análisis, entre las que se encuentran: microscopía óptica para el estudio del soporte y las secciones transversales de micro muestras de pinturas presentes y microscopía electrónica de barrido con microanálisis por espectrometría de dispersión de energía de rayos X (SEM-EDXS), que aporta información sobre la composición de pigmentos y cargas. También se realizaron análisis por espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), con microscopio FTIR, que permite la identificación de un amplio rango de componentes tanto orgánicos como inorgánicos presentes en la obra. La caracterización más precisa de los barnices y aglutinantes se realizó mediante cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS) y mediante la técnica de pirolisis-cromatografía de gases-espectrometría de masas (Py-GC-MS). Además con estas mismas técnicas se hizo un seguimiento continuo y pormenorizado del proceso de eliminación de los materiales añadidos, ajenos al proceso de ejecución del artista.

Gracias a estos estudios analíticos ha sido posible identificar y distinguir los materiales utilizados por el artista y los añadidos posteriormente y se ha confirmado que la capa de barniz principal no era original ya que aparecía un material

sinéptico inexistente en la fecha de realización de la pintura. Este dato ha sido fundamental para valorar su eliminación. Las medidas espectrales realizadas antes y después del tratamiento de restauración interesan especialmente en éste caso como comprobación objetiva de los cambios que dicha intervención ha producido en la apariencia de la superficie pictórica. Asimismo un seguimiento en el tiempo con este tipo de mediciones puede ser muy valioso para testar la estabilidad de los colores de la obra.

El proceso de caracterización espectral ha consistido en la medida del factor de reflectancia en una matriz rectangular de 14x10 puntos repartidos uniformemente sobre la superficie de la obra, además se realizaron medidas del factor de reflectancia en zonas de especial interés por su estado de conservación que fueron indicadas por el departamento de restauración del MNCARS. El proceso de medida se llevó a cabo en dos series de medida diferentes, una previa a la restauración y otra posterior.

Las medidas se tomaron siguiendo la recomendación de la CIE [32] con una geometría de medida $45^\circ \times 0^\circ$. El sistema de iluminación utilizado fue un proyector tipo Köhler desarrollado ad hoc, como fuente de iluminación se utilizó una lámpara incandescente alimentada en corriente continua mediante una fuente de alimentación Delta Electronics ADP60WB. Para evitar que las zonas de la obra que no estaban siendo iluminadas recibieran radiación de manera innecesaria se colocó un diafragma cuadrado en la pupila de salida del condensador que

delimitaba el área de medida. La figura 29 muestra un esquema del sistema óptico de iluminación utilizado.

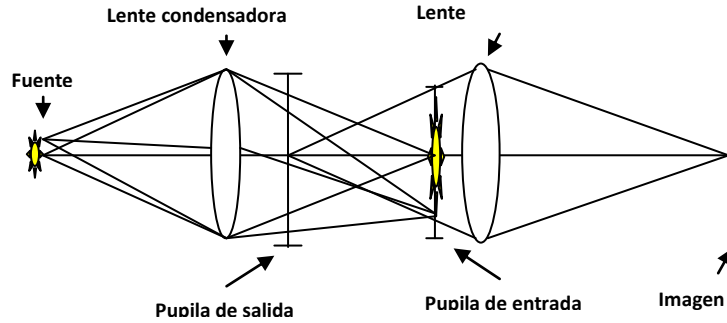


Figura 29: Esquema del sistema de iluminación tipo Köhler utilizado.

Como en el trabajo realizado sobre la obra Guernica descrito en el apartado 3.1, el instrumento utilizado para el registro espectral de los estímulos de color fue un espectralradiómetro sin contacto de marca Photo Research modelo PR655, equipado con un objetivo MS75. Se acopló un sistema de registro de imagen sobre el ocular del espectralradiómetro para registrar imágenes del punto medido y verificar la posición de medida en las dos tandas.

La figura 30 muestra un ejemplo de la imagen tomada sobre el punto medido, el área negra circular de la imagen se corresponde con la posición del estímulo de color medido. El diámetro del punto medido a la distancia a la que se colocó el espectralradiómetro de la obra es de 5mm.

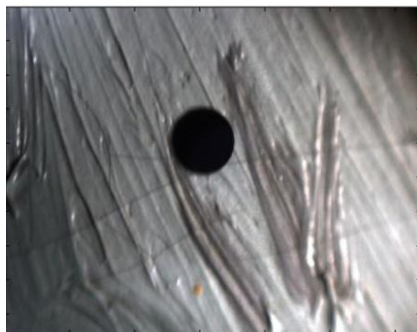


Figura 30: Imagen de uno de los puntos sobre los que se realizan las medidas.

En este trabajo, el espectroradiómetro y la fuente de iluminación permanecían estáticos, el posicionamiento de los puntos de medida se conseguía por el movimiento de la pintura, colocada sobre unos carriles de desplazamiento en dos ejes motorizados, que permitían una gran precisión en el posicionamiento de la obra. El blanco de referencia utilizado para las medidas del factor de reflectancia fue un blanco del 99% de reflectancia marca LabSphere, modelo SRS 99, colocado en un lateral de la obra a la misma distancia del espectroradiómetro que la superficie de la pintura. Para compensar la variación en el espectro de emisión de la fuente de iluminación por el envejecimiento, se realizó una medida del blanco de referencia para cada columna medida, por ello para los cálculos del factor de reflectancia se utiliza una misma medida sobre el blanco de referencia para el cálculo de cada 14 puntos. Los datos obtenidos se almacenan en una matriz de 14x10x101 puntos para su posterior análisis.

3.2.1. Análisis de resultados

Para cuantificar el resultado del proceso de restauración sobre el aspecto global de la obra se ha realizado un análisis de los datos en tres pasos. Por un lado se ha analizado la transmitancia espectral de la capa retirada durante la restauración comparando las medidas del factor de reflectancia tomadas antes y después de la intervención. En segundo lugar se ha calculado la influencia en la percepción que tenía la capa retirada simulando la visualización de un blanco ideal al interponer la capa retirada en cada punto. Por último se ha realizado un análisis de los datos utilizando el método de análisis por componentes principales (PCA).

3.2.1.1. Análisis espectral

Uno de los objetivos del proyecto de investigación realizado era comparar el factor de reflectancia antes y después del proceso de restauración, por lo que la repetición en el posicionamiento de los puntos de medida fue de vital importancia. Para reducir al máximo posible los errores debidos al posicionamiento, cada una de las medidas (antes y después de la restauración) fue llevada a cabo en 3 tandas diferentes entre las que se reposicionaba todo el sistema de medida para estimar los errores fruto de la colocación del instrumental. En cada una de las tandas, la medida espectral se tomaba realizando la media de 3 medidas manteniendo la posición, por lo que la información

espectral de cada punto en cada serie medida es la media de 9 medidas tomadas sobre el mismo punto reposicionando 3 veces.

El valor de factor de reflectancia ($\bar{\rho}$) en un punto dado queda definido por la ecuación (3-10):

$$\bar{\rho}(\lambda) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \rho_m(\lambda), \quad (3-10)$$

donde $\rho(\lambda)$ es el factor de reflectancia medido en cada una de las tandas y M es el número de medidas realizadas, en este caso $M = 9$.

La desviación estándar de las medidas queda definida por la ecuación (3-11):

$$\delta \bar{\rho}(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\rho_m(\lambda) - \bar{\rho}(\lambda))^2}. \quad (3-11)$$

La desviación estándar promedio que se consiguió utilizando esta metodología de trabajo fue del 2.45% para las medidas realizadas previamente a la restauración y del 6.84% para las medidas posteriores. Estas desviaciones se consideraron adecuadas para los objetivos del trabajo.

La posición de los puntos medidos sobre la obra se muestra en la figura 31:



Figura 31: Posición de la matriz rectangular de puntos medidos sobre la obra.

Para comparar el efecto de la restauración sobre el factor de reflectancia se calculó la transmitancia de la capa de barniz y suciedad retirada de la pintura de acuerdo a la ecuación (3-12).

$$\tau_m(\lambda) = \frac{\bar{\rho}_m(\lambda)}{\bar{\rho}'_m(\lambda)}, \quad (3-12)$$

donde $\bar{\rho}_m(\lambda)$ es el factor de reflectancia del punto m previo a la restauración, $\tau_m(\lambda)$ es la transmitancia espectral de la capa retirada en el punto m y $\bar{\rho}'_m(\lambda)$ es el factor de reflectancia posterior al proceso de restauración en el punto m .

Si el espesor y composición de la capa retirada fuera uniforme a lo largo de toda la superficie de la obra, la transmitancia espectral media equivalente ($\bar{\tau}(\lambda)$) quedaría definida según la ecuación (3-13):

$$\bar{\tau}(\lambda) = \frac{1}{140} \sum_{m=1}^{140} \tau_m(\lambda) . \quad (3-13)$$

La figura 32 muestra la curva transmitancia espectral media equivalente, con las curvas de percentil 5 y 95, representadas a la vez que las transmitancias espectrales calculadas para los 140 puntos medidos. El hecho de que existan algunas transmitancias por encima de la unidad indica que algunos puntos medidos perdieron cantidad de luz reflejada tras el proceso de restauración, esto puede deberse a la disminución de los reflejos al retirar la capa de barniz de la superficie de la obra y actuar la superficie de la pintura, vista ahora directamente, como un mejor difusor que antes de la restauración.

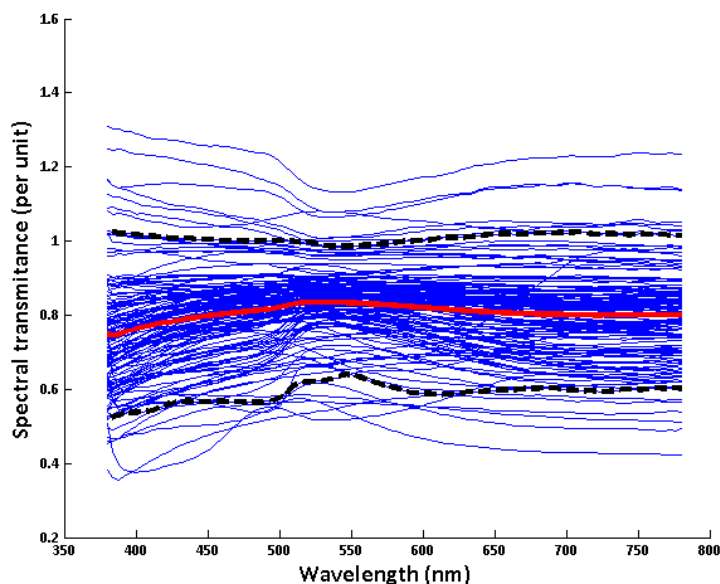


Figura 32: Transmitancias espectrales (tanto por uno) de la capa retirada tras la restauración para los 140 puntos medidos (líneas azules). Transmitancia media equivalente (en rojo) con las curvas de percentil 5/95 (negro discontinuo)

3.2.1.2. Análisis colorimétrico

Para poder estimar la influencia de la capa retirada sobre el color percibido de la obra, se han calculado las coordenadas cromáticas de la capa de barniz retirada en el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$. Los cálculos se han realizado utilizando el observador patrón CIE de 2° y el iluminante patrón CIE A [51]. Los cálculos simulan cómo se vería un estímulo de color blanco perfecto, es decir, que sin barniz, las coordenadas cromáticas del estímulo serían $L^* = 100$, $a^* = 0$ y $b^* = 0$. La figura 33 muestra las coordenadas cromáticas calculadas de los 140 puntos medidos en la matriz. Se puede apreciar que la mayor parte de las transmitancias desplazan el blanco ideal en mayor o menor medida hacia la zona de los amarillos verdosos ($+b^*, -a^*$), y además, la gran mayoría de las medidas disminuyen la luminosidad.

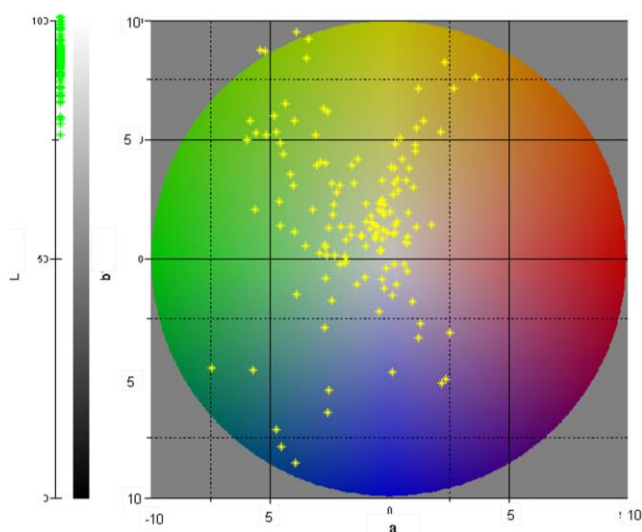


Figura 33: Coordenadas cromáticas calculadas para la capa retirada

3.2.1.3. Análisis de componentes principales

Para encontrar un patrón de comportamiento global de las medidas del factor de reflectancia se ha realizado un análisis de componentes principales (PCA).

El análisis de componentes principales requiere unas dimensiones adecuadas de la matriz de datos a analizar. Debido al reducido tamaño de la matriz medida (14 x 10 puntos), y la longitud del vector de factor de reflectancia (101 longitudes de onda medidas), fue necesario realizar 300 iteraciones del análisis de componentes principales seleccionando 90 puntos de medida al azar en cada una de las iteraciones. Gracias a este procedimiento fue posible obtener una dispersión de los datos que refleja la variabilidad del factor de reflectancia en las distintas zonas del cuadro. Las componentes principales representan pseudo-espectros de contribución a la covarianza de los datos en función de la longitud de onda.

Al comparar la primera componente principal obtenida tras el análisis de los datos antes y después del proceso de restauración, se puede apreciar que existe una gran similitud entre los pseudo-espectros obtenidos. Este pseudo-espectro podría describirse como la base espectral de la obra, que permanece constante antes y después del proceso de restauración. La primera componente principal explica un 82.38% y un 89.21% de la covarianza espectral de los datos antes y después del proceso de restauración respectivamente como se

muestra en la figura 33. Además se encuentra que existe una dispersión de los datos muy baja, por lo que la primera componente principal es muy parecida para todas las medidas realizadas.

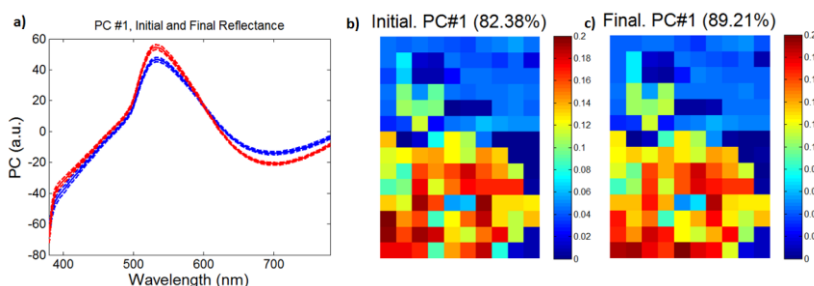


Figura 34: Distribución espectral correspondiente a la primera componente principal antes (línea azul) y después (línea roja) del proceso de restauración (a). Las líneas discontinuas muestran las curvas de percentil 5/95 correspondientes. A la derecha se representa la importancia del pseudo-espectro en las distintas regiones del cuadro antes (b) y después del proceso de restauración (c).

Como se aprecia en la figura 34, la importancia del pseudo-espectro de la primera componente principal permanece prácticamente igual antes y después del proceso de restauración, por lo que la primera componente principal no tiene un gran interés a la hora de evaluar los cambios que se han producido durante el proceso de restauración, aunque servirá para comparar en medidas futuras y evaluar la evolución temporal de la obra.

Al comparar la segunda componente principal antes y después del proceso de restauración se aprecia que el porcentaje de covarianza espectral de los datos ha disminuido drásticamente tras el proceso de restauración. Además se aprecia que el proceso

de restauración ha aumentado la variabilidad espacial de la componente. También se observa que la dispersión de los datos ha aumentado. La figura 35 muestra el pseudo-espectro correspondiente a la segunda componente principal y los valores iniciales y finales de la importancia de espacial de la componente.

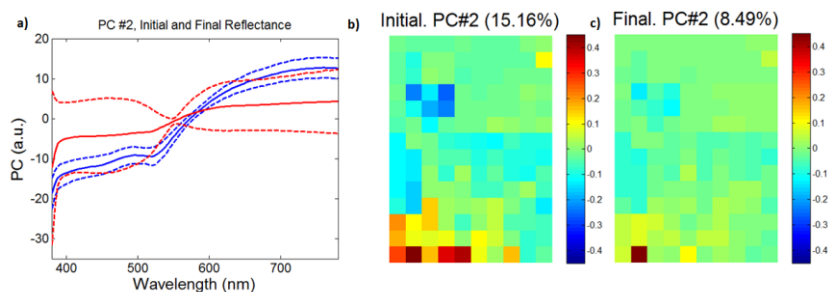


Figura 35: Distribución espectral correspondiente a la segunda componente principal antes (línea azul) y después (línea roja) del proceso de restauración (a). Las líneas discontinuas muestran las curvas de percentil 5/95 correspondientes. A la derecha se representa la importancia del pseudo-espectro en las distintas regiones del cuadro antes (b) y después del proceso (c).

Para realizar este análisis se ha prestado atención a los valores positivos o negativos del mapa (ver escala en el lateral del mapa de color de la figura 35). Se puede apreciar como la importancia de la segunda componente después del proceso de limpieza es bastante uniforme (a excepción de la zona inferior izquierda que se corresponde con una zona de repinte), lo cual indicaría una correcta actuación a la hora de eliminar el efecto del barniz que no llega a capas pictóricas, si bien hay puntos en el cuadro donde se aprecia una mayor importancia debido a que eran zonas de repinte.

*“La luz irrumpe donde ningún sol brilla, donde no
se alza mar alguno, las aguas del corazón
impulsan sus mareas”*

Dylan Thomas

4. Sistemas avanzados de iluminación

En el presente capítulo se revisan cuáles son las recomendaciones básicas de iluminación que se están aplicando en las instituciones en las que se exponen los bienes de interés cultural, asimismo se presentan las principales fuentes de iluminación que se están utilizando y se proponen, en base a las investigaciones realizadas durante la realización de esta tesis doctoral, dos alternativas para optimizar los sistemas de iluminación en dos entornos diferentes.

4.1. Modelo actual de iluminación

Como se comentó en el capítulo de introducción, la iluminación de bienes de interés cultural es un dilema constante entre visibilidad y vulnerabilidad. Las instituciones responsables de la conservación y exposición de bienes culturales dedican gran cantidad de recursos a definir unos parámetros adecuados para el diseño de sistemas de iluminación apropiados para la visualización de bienes culturales que minimicen el deterioro producido sobre sus superficies [52-55].

Atendiendo a los parámetros fotométricos necesarios para una correcta visualización de un estímulo de color, es necesario tener en cuenta el flujo luminoso que incide en la superficie del estímulo, la reflectancia espectral del estímulo y la composición espectral de la fuente que se va a utilizar, el tipo de observador

que visualizará el estímulo, la posición de la fuente y la configuración del espacio en el que se exhibe la obra. Para una correcta conservación de un bien de interés cultural, los parámetros que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar la iluminación de una exposición son la naturaleza de los materiales que componen los bienes a exponer, la composición espectral de la luz, la sensibilidad del material a la radiación visible y en función de estos parámetros, el umbral de iluminancia apropiado para iluminar el material y la exposición límite anual recomendados por la normativa vigente [9] y la bibliografía especializada, [10], [53], [56].

La cantidad de flujo luminoso (Φ_v) que incide sobre una superficie viene determinado por la iluminancia (E_v), la iluminancia mínima a partir de la que se produce una correcta visualización del color ha sido establecida en el entorno de entre 2 lux, [57] y 10 lux, [58], aunque habitualmente, se ha establecido un límite mínimo para una correcta visualización de bienes de interés cultural expuestos en museos de 50 lux, basándose en la experiencia de los responsables de la iluminación en instituciones museísticas [59].

La magnitud fotométrica que determina la intensidad luminosa por unidad de superficie aparente de un estímulo de color, captada por el ojo humano, es la luminancia (L_v). La percepción visual de estímulos de color, con luminancias entre 3×10^{-6} y 3×10^{-3} cd/m^2 (visión escotópica), se produce por la

respuesta únicamente de los bastones, por lo que en esas condiciones, la agudeza visual del observador es muy baja y no existe visión de color. La respuesta de los conos, responsables de la visión del color y de la visión foveal (como vimos en el capítulo 2, la fovea es la región de la retina en la que se acumula la mayoría de los conos y responsable de la visión de detalles), comienza al observar estímulos de color con luminancias en el entorno de las $3 \times 10^{-3} \text{ cd/m}^2$ (visión mesópica), pero no es hasta que se supera el entorno de las 3 cd/m^2 (visión fotópica) cuando se completa la adaptación total de los conos y comienza una percepción correcta de los colores y una elevada agudeza visual [60].

La figura 36 muestra los umbrales de luminancia a partir de los cuales se dan los distintos tipos de visión [61].

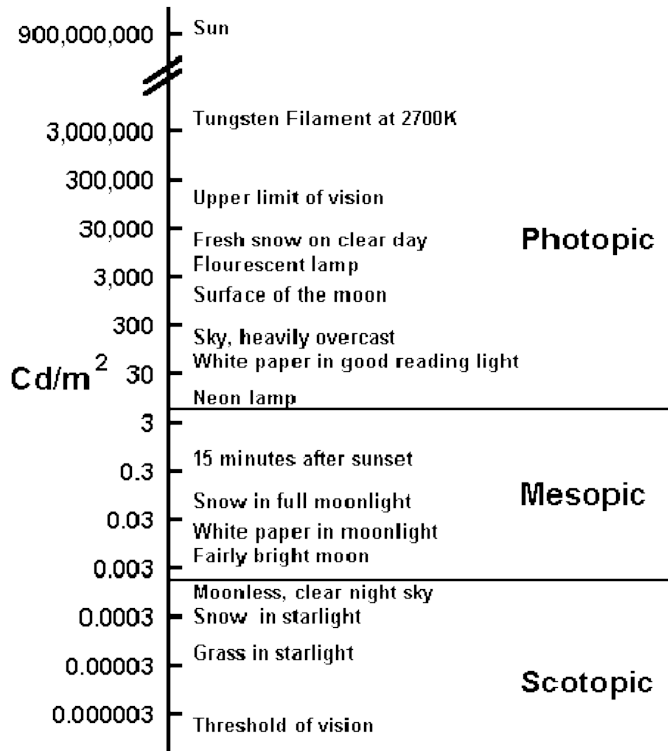


Figura 36: Escala logarítmica de luminancias a las que se produce la adaptación del ojo humano desde condiciones escotópicas (scotopic), pasando por condiciones mesópicas (mesopic), en las que se produce la transición de visión monocromática a visión de color, hasta visión fotópica (photopic) en la que la visión de color es completa. Fuente: Crawford [62]

Las normas básicas de iluminación de bienes culturales, definidas en función de la naturaleza de los materiales que componen los bienes, están establecidas tanto para entornos en los que es posible un control total de la iluminación, como pueden ser salas de exposiciones o museos donde la iluminación natural no existe o está completamente controlada, como para entornos en los que el control de los parámetros de iluminación es parcial, como pueden ser salas situadas en edificios históricos

con iluminación natural, [63] o casa particulares en las que se exponen bienes culturales [62].

En entornos con un control total de iluminación, las recomendaciones para la iluminación de bienes de interés cultural compuestos por materiales de naturaleza orgánica en general o inorgánica que muestren sensibilidad a la radiación visible y/o ultravioleta, establecen una iluminancia máxima de 50 lux sobre el bien (mientras esté siendo observado) y una cantidad de radiación ultravioleta emitida por la fuente de iluminación inferior a 10 $\mu\text{W}/\text{lm}$. En el caso de bienes de interés cultural compuestos por materiales inorgánicos que no sean sensibles a la radiación ultravioleta, la normativa no establece un valor límite de iluminancia, el límite de iluminancia es aquel que no incremente la temperatura superficial del bien de interés cultural más de 5°C por encima de la temperatura ambiental.

Los valores límite de iluminancia pueden variar para mejorar la visibilidad del objeto bajo determinadas condiciones:

- Si los detalles a observar en el bien de interés cultural tienen un contraste bajo, la iluminancia máxima puede aumentarse en un factor 3. Estudios realizados sobre el funcionamiento del sistema visual en función de las condiciones de iluminación muestran que un incremento en la luminancia del estímulo visual mejora la percepción visual [64].

- Si la superficie del objeto es oscura, es decir, tiene una reflectancia media baja, la iluminancia máxima puede aumentarse en un factor 3. El funcionamiento del sistema visual depende de la luminancia del estímulo que se visualiza, y la luminancia es altamente dependiente de la iluminancia que la fuente de iluminación genera sobre el estímulo y de la reflectancia del propio estímulo.
- Si la edad de los observadores para los que está destinada la iluminación del objeto es elevada, la iluminancia máxima puede incrementarse en un factor 3. Las pruebas realizadas por Blackwell [65] en las que se midió el funcionamiento del sistema visual en 156 observadores normales entre los 20 y los 70 años, utilizando como test de evaluación de la calidad visual la sensibilidad al contraste, muestran que un observador normal en la horquilla de 60 a 70 años tiene un umbral de sensibilidad al contraste un 60.16% inferior al umbral de sensibilidad al contraste de un observador normal en la horquilla de edad de 20 a 30 años, mientras que un observador normal de entre 40 y 50 años tendrá un umbral de sensibilidad al contraste un 16.7% inferior que el observador normal de 20 a 30 años.
- En ocasiones, es necesario realizar estudios y procesos de medida complejos sobre los bienes de interés cultural los cuales requieren de una iluminancia superior a 50 lux

durante un tiempo limitado, una de estas ocasiones puede ser un proceso de caracterización espectral, por ejemplo. La iluminancia máxima sobre la obra puede aumentarse en un factor 3 en estas ocasiones.

En los casos en los que se combinen estas condiciones para la mejora de la visibilidad, está permitido multiplicar los factores, por ejemplo, el límite de iluminancia que se recomendaría en el caso de la iluminación para la caracterización espectral de un cuadro (x3), pintado con colores oscuros (x3), y con un bajo contraste entre los detalles (x3) sería: $50 \times 3 \times 3 \times 3$ lux, es decir 1350 lux. Aunque como se explica a continuación, estos valores también pueden sufrir variaciones en función de la vulnerabilidad de los materiales que sean iluminados [56].

Como se comentó en el capítulo de introducción, la normativa para el control de daños producidos por la radiación en museos [9] divide los materiales expuestos en cuatro categorías en función de su sensibilidad a la radiación. La clasificación de estos materiales se realiza según la normativa EN ISO 105-B02 1999 + A1 2002 [66]. Esta normativa determina la fotorresistencia de un tinte sobre un soporte textil comparando (de manera subjetiva) la variación en el color del tinte tras ser expuesto a una cierta cantidad de radiación con la variación en el color de ocho muestras estándar de tintes azules estándar sobre lana. A esta escala se le suele llamar escala ISO o escala Blue Wool de fotorresistencia.

Para realizar los ensayos de fotorresistencia se utilizan cámaras de exposición a la radiación que utilizan por lo general lámparas de xenón filtradas para disminuir la radiación en las regiones ultravioleta e infrarroja. La normativa recomienda una irradiancia de 1.1 W/m^2 a 420 nm si se utiliza como fuente de iluminación una lámpara de xenón refrigerada por agua, las cámaras de exposición tienen por lo general control de humedad y temperatura para garantizar la trazabilidad de los ensayos. La temperatura a la que se someten las muestras está entre los 45°C y los 65°C en función del tipo de ensayo.

La figura 37 muestra un ejemplo de muestras de la escala Blue Wool antes y después de un ensayo de fotorresistencia.



Figura 37: Muestras de la escala Blue Wool antes y después de un ensayo de fotorresistencia.

Los valores de exposición (en Mlux/h) que se considera que es probable que causen un cambio en el color del pigmento en función de su clasificación en la escala Blue Wool se muestran en la tabla 5:

Categoría Blue	Exposición que causa	Exposición que causa
Wool	decoloración con UV (Mlux/h)	decoloración sin UV (Mlux/h)
1	0.22	0.3
2	0.6	1
3	1.5	3
4	3.5	10
5	8	30
6	20	100
7	50	300
8	120	1100

Tabla 5: Valores de exposición que probablemente causen una variación en el color del pigmento. Fuente CIE 157:2004 [9]

Las variaciones en los valores de iluminancia máxima recomendada determinados en función de la vulnerabilidad de los materiales que componen los bienes de interés cultural tienen como objetivo reducir la variación en el color de los materiales a un paso mínimamente perceptible por cada diez años de exposición.

- Para pigmentos “fugitivos”, es decir, en los que presenten valores de 1, 2 o 3 en la escala Blue Wool, la normativa recomienda reducir todos los ajustes que se realicen sobre los 50 lux de base para mejorar la visibilidad a un factor total de x3, es decir un máximo de 150 lux y exponerlos solo el 10% del tiempo normal de exposición. Durante los periodos de estudio no se deben superar los 1500 lux durante un máximo del 1% del tiempo de exposición.

- Para pigmentos con estabilidad “intermedia”, es decir que tengan valores de 4, 5 o 6 en la escala Blue Wool, la normativa recomienda reducir todos los ajustes sobre los 50 lux iniciales para mejorar la visibilidad a un factor total de x3. En este caso se establece un máximo de 150 lux de iluminancia sobre la superficie del bien para exposiciones permanentes. En caso de que fuera necesario exponer el bien a niveles más elevados de iluminancia, el tiempo de exposición se debería reducir proporcionalmente según el principio de reciprocidad [13].
- Para pigmentos “duraderos”, es decir con valores de 7 y 8 en la escala Blue Wood, la normativa recomienda limitar los ajustes para mejorar la visibilidad a un factor máximo de x30.

En entornos expositivos en los que no es posible el control total de la iluminación, las recomendaciones para la iluminación de bienes de interés cultural compuestos por materiales de naturaleza orgánica en general o inorgánica que muestren sensibilidad a la radiación visible y/o ultravioleta, establecen una iluminancia máxima que evite el rango de 1000 lux a 100000 lux, es decir, que no se sitúe el bien de interés cultural cerca de fuentes eléctricas de alta potencia o cerca de ventanas en las que incida la luz directa del Sol. El límite de radiación ultravioleta en este caso está establecido en los 75 $\mu\text{W}/\text{lm}$. Las recomendaciones

para maximizar la durabilidad en estos entornos expositivos en función de la vulnerabilidad de los materiales que componen los bienes expuestos son las siguientes:

- Para pigmentos “fugitivos” (Blue Wool 1, 2 o 3) se recomienda mantener los bienes alejados de cualquier localización en la que se excedan los 150 lux medios durante diez horas al día. Se deben exponer estos bienes sólo el 10% del tiempo establecido para una exposición normal.
- Para pigmentos “intermedios” (Blue Wool 4, 5 o 6) se deben evitar localizaciones que excedan los 150 lux medios durante diez horas al día, aunque en este caso no se limita el tiempo de exposición. En caso de que en la localización se excedan los 150 lux durante diez horas se debe disminuir el tiempo de exposición proporcionalmente.
- Para pigmentos “duraderos” se recomienda evitar colocar los bienes en zonas que excedan una iluminancia media de 1500 lux medios durante diez horas al día.

Estas normas generales permiten a las instituciones responsables de la exposición y conservación de bienes de interés cultural seguir unas pautas a la hora de diseñar la iluminación de las exposiciones, aunque como veremos a continuación, es posible mejorar sustancialmente la iluminación de bienes de interés cultural estudiando individualmente cada caso y utilizando

nuevas fuentes de iluminación con distribuciones espectrales variables.

Las fuentes de iluminación preferidas por los diseñadores de iluminación de bienes de interés cultural son las fuentes de espectro continuo debido a que quedan descritas fielmente gracias a la temperatura correlacionada de color (CCT) y al índice de rendimiento de color (CRI) [67].

La temperatura correlacionada de color se define como la temperatura de una fuente de radiación tipo cuerpo negro que tenga una cromaticidad lo más próxima posible a una distribución espectral dada (utilizando el observador patrón CIE de 2°). Este concepto sólo es aplicable a fuentes que tienen una cromaticidad próxima a la de un radiador tipo cuerpo negro [32].

Un radiador tipo cuerpo negro, es un objeto ideal que absorbe toda la radiación que incide sobre él y que emite radiaciones electromagnéticas de acuerdo a la ley de Planck [68]. La intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro que está a una temperatura (T) para una frecuencia (ν) dada está determinada por la ecuación (4-1).

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \quad (4-1)$$

donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz y k es la constante de Boltzmann.

4.1.1. Tipos de fuentes de iluminación más habituales en museos

Las lámparas más utilizadas en instituciones museísticas han sido históricamente las de tipo incandescente [67], con CCT en el entorno a los 3000K y CRI muy próximos a 100. Orientadas hacia los objetos expuestos permiten un confort visual adecuado, pero presentan algunos inconvenientes que hacen que su uso no sea ideal desde el punto de vista de la conservación. Las fuentes incandescentes producen gran cantidad de calor, que es negativo en varios sentidos para los museos, en primer lugar, el calor que generan las lámparas incandescentes es un gasto energético que no produce radiación luminosa, en segundo lugar, la radiación infrarroja también es causante de deterioro en los bienes de interés cultural, en último lugar, el uso de lámparas incandescentes aumenta la temperatura ambiental de las salas, por lo que su control incrementa el gasto energético en aire acondicionado. El uso de lámparas halógenas con filtros dicróicos evita en parte el problema de la incidencia de radiación infrarroja sobre la superficie del bien de interés cultural pero mantiene el problema del calentamiento [69]. Aunque presenten un CRI muy alto, la distribución espectral de la radiación visible emitida por las lámparas incandescentes es muy baja para las longitudes de onda cortas y muy elevada para las largas, por lo que en ocasiones pueden influir en la percepción cromática de la obra en un sentido no deseado.

El uso de lámparas fluorescentes como fuentes de iluminación evita el problema de la generación de calor, aunque debido a los problemas potenciales generados por la electrónica que suelen llevar asociadas [70], y a las molestias visuales que producen fruto de la modulación de la luz [71], las fuentes de iluminación fluorescentes no son idóneas en todas las situaciones [69]. Los fluorescentes utilizados mayoritariamente para la iluminación de bienes culturales son los de tipo “luz día”, es decir, con CCT en el entorno de los 6500K, aunque como se comenta más adelante, conviene utilizar fuentes con una CCT inferior, ya que, un aumento en la CCT de la fuente de iluminación se traduce en un aumento del potencial de la fuente para causar daño sobre los materiales que componen los objetos iluminados.

La iluminación utilizando lámparas incandescentes guiadas por fibra óptica también ha sido estudiada, ofrece la ventaja de alejar la fuente de radiación térmica del punto de aplicación de la iluminación, aunque tiene un coste económico muy alto [72].

El uso de diodos emisores de luz (LED), está siendo cada vez más habitual [73], aunque existe algo de escepticismo entre los diseñadores de iluminación para exposición de bienes de interés cultural debido a los valores bajos de CRI que ofrecen [74]. Como se comentó en el capítulo de introducción, el índice de reproducción cromática presenta algunos problemas a la hora de evaluar el comportamiento de fuentes de iluminación con una distribución espectral no continua, como es el caso de las fuentes

LED basadas en tres o más primarios (RGB o RGBA por ejemplo) [16].

4.1.2. Cálculo del daño producido por las fuentes de iluminación

A la hora de estudiar la idoneidad de una fuente u otra para iluminar un bien de interés cultural es de gran utilidad recordar que el daño (DM) que una fuente de iluminación puede causar sobre un material depende en primer lugar de la composición espectral de la fuente de iluminación y en segundo lugar de la sensibilidad espectral de ese material. El procedimiento recomendado para el cálculo del daño relativo causado por las fuentes de iluminación sobre los materiales que componen los bienes de interés cultural está basado en el llamado “*modelo de Berlín*” [12].

De acuerdo con el modelo de Berlín, la irradiancia efectiva que causa daño (E_{dm}) depende de la irradiancia espectral de la radiación ($S(\lambda)$) y de la responsividad espectral relativa ($D(\lambda)$) de los materiales que componen el bien de interés cultural según muestran las ecuaciones (4-2) y (4-3).

$$E_{dm} = \sum_{\lambda_0}^{\lambda} S(\lambda)D(\lambda) , \quad (4-2)$$

donde

$$D(\lambda) = e^{-\alpha(\lambda-300)} , \quad (4-3)$$

donde α es una constante que depende del tipo de material.

La responsividad espectral relativa de los materiales está normalizada para la longitud de onda 300nm.

La exposición radiante efectiva (H_{dm}) es la irradiancia efectiva que recibe un material a lo largo del tiempo, y está definida por la ecuación (4-4).

$$H_{dm} = \int E_{dm} dt , \quad (4-4)$$

Y el umbral de la exposición radiante efectiva ($H_{s,dm}$) que causa un cambio de color mínimamente apreciable ($\Delta E_{a*b}^* = 1$) queda definido por la ecuación (4-5).

$$H_{s,dm} = E_{dm} t_s, \quad (4-5)$$

donde t_s es la duración crítica de la exposición en h.

Los valores que adopta la constante α en función del material según el modelo de Berlín se muestran en la tabla 6.

Muestras	$H_{s,dm}$ (W h/m ²)	α
Papel de baja calidad	5	0.0380
Papel tela	1200	0.0125
Pinturas al óleo sobre lienzos	850	0.0115
Textiles	290	0.0100
Colores al agua en papel tela	175	0.0115

Tabla 6: Valores del umbral de exposición radiante efectiva y de la constante α en función del tipo de material. Fuente: CIE 157:2004 [9]

Los trabajos realizados durante el periodo de investigación que se recoge en esta memoria de tesis han seguido dos criterios de optimización de la distribución espectral de las fuentes de iluminación presentadas como solución a los problemas

propuestos por las instituciones museísticas. Por un lado, la optimización de la distribución espectral de las fuentes de iluminación primando la percepción visual, permite dar solución a problemas como la percepción de diferencias entre metámeros empleados como técnica de restauración de bienes de interés cultural. Esta diferencia es percibida con claridad cuando se emplea distintas fuentes de iluminación a la hora de iluminar la obra para la exposición y para el proceso de restauración. Así mismo es posible mejorar el contraste en los detalles de un bien de interés cultural especialmente sensible a la iluminación, permitiendo mantener la calidad en la visualización disminuyendo la iluminancia de la fuente sobre la superficie del bien. Por otro lado, la optimización de la distribución espectral de las fuentes de iluminación primando un mínimo deterioro de los bienes culturales permite incrementar la duración de la exposición manteniendo las condiciones de visualización.

A continuación se presentan los resultados de dos estudios en los que la optimización de la distribución espectral de la fuente de iluminación utilizada fue la parte central del trabajo.

4.2. Estudio de la variación entre metámeros al variar la iluminación en la obra “Muchacho con turbante y ramillete” de Michiel Sweerts.

Uno de los principales problemas que surgen a la hora de iluminar una obra pictórica que ha sufrido procesos de restauración es la subjetividad a la hora de igualar el aspecto visual entre la zona original y la zona restaurada [75], ya que por un lado, en el proceso de restauración la igualación de los colores que se aplicaran en las zonas intervenidas se realiza por comparación visual basada en la experiencia y el buen hacer del restaurador, y por otro lado, aunque en un primer momento el color de la pintura seleccionada para el área restaurada sea idéntico al original, la evolución del color de esa pintura al sufrir los procesos de degradación derivados de su exposición no será igual que la evolución de la zona original [76], lo cual, ineludiblemente generará una diferencia cromática.

Previamente se ha definido el metamerismo como el fenómeno psicofísico que se da cuando estímulos de color con distinta distribución espectral producen la misma sensación visual al observador. Dos metámeros observados bajo una fuente de iluminación pueden dejar de serlo si se varía la iluminación. En el caso de la restauración de pinturas, el proceso de restauración se lleva a cabo utilizando fuentes de iluminación con un alto índice de reproducción cromática, pero, estas fuentes pueden ser

diferentes a las fuentes de iluminación utilizadas en la sala de exposición una vez finalizado el proceso de restauración.

El trabajo realizado para este estudio comenzó realizando una caracterización espectral de las zonas restauradas y las zonas adyacentes a las restauradas en la obra “*Muchacho con turbante y ramillete*” de Michiel Sweerts, perteneciente a la colección Thyssen-Bornemisza, y actualmente expuesto en el Museo Thyssen Bornemisza de Madrid. Posteriormente se realizaron los cálculos colorimétricos necesarios para obtener las coordenadas cromáticas de las zonas originales y las restauradas y se calculó la diferencia cromática entre ambas bajo los 27 iluminantes patrón propuestos por la CIE [15] para permitir seleccionar las fuentes de iluminación más apropiadas para la exposición de la obra. Los resultados obtenidos tras la realización de este trabajo fueron presentados en un congreso [77].

4.2.1. Caracterización espectral

La caracterización espectral de la obra se realizó siguiendo la recomendación de la CIE para medidas espectrales [15], se midió el factor de reflectancia con una geometría de medida $45^\circ \times 0^\circ$. El espectroradiómetro que se utilizó fue de la marca Photo Research, modelo PR655 SpectraScan, este modelo permite tomar medidas espectrales sin contacto, captando la radiación proveniente del área de medida a través de un objetivo. El objetivo que se utilizó para la caracterización espectral fue el modelo MS75 con una apertura angular de 0.5° , que situado a

una distancia de la obra de 355mm permite medir un área de 2.63mm de diámetro. Como fuente de iluminación se utilizó una lámpara incandescente colimada, con un campo de iluminación delimitado por un diafragma para evitar que incidiera radiación en zonas no deseadas, la fuente estaba alimentada con corriente continua para eliminar la influencia de las fluctuaciones de la corriente alterna. Para la toma del espectro de emisión de la fuente sobre un blanco de referencia se utilizó un blanco calibrado con un 99% de reflectancia para todo el espectro visible de la marca LabSphere modelo SRS99.

La figura 38 muestra un esquema del montaje en el que se incluye el montaje optomecánico que se utilizó para permitir el movimiento del sistema de medida sin variar la geometría de medida.

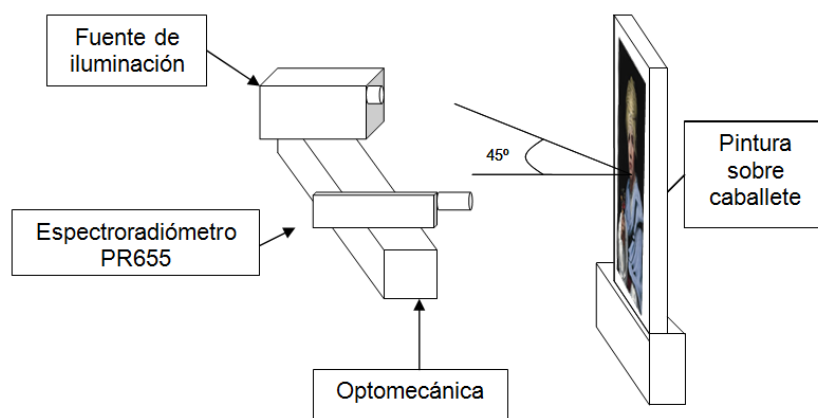


Figura 38: Esquema del montaje utilizado para caracterización espectral en el caso de aplicación.

La selección de las zonas de medida adecuada se realizó con la colaboración del departamento de restauración del Museo Thyssen-Bornemisza, identificando las zonas que habían sido restauradas con la ayuda de una imagen tomada bajo radiación ultravioleta (UV), en la figura 39 se muestran las cuatro zonas medidas sobre la imagen en el espectro visible y en UV, dado que el proceso de restauración consistió en una reintegración cromática mediante la técnica del “rigatino” [78], las zonas originales y restauradas eran fácilmente identificables con el aumento del objetivo del espectroradiómetro la zona original y la restaurada, a pesar de tener un color muy similar.

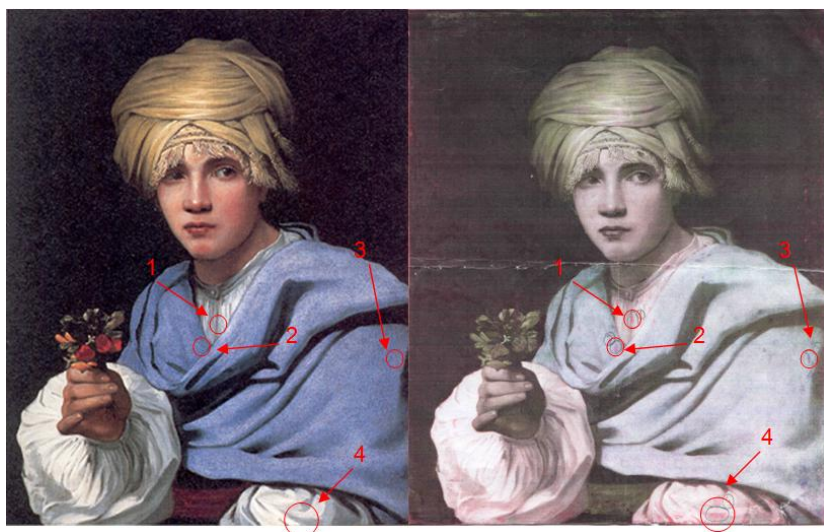


Figura 39: Zonas sobre las que se han realizado las medidas marcadas sobre una imagen en el espectro visible (derecha) y otra imagen en el espectro UV. Fuente [77].

Se tomaron 3 medidas de cada punto, el factor de reflectancia utilizado para los cálculos colorimétricos es la media de las tres medidas. La figura 40 muestra los factores de reflectancia medios medidos en cada una de las zonas, diferenciando las medidas tomadas sobre las zonas originales de la pintura y las tomadas sobre las zonas restauradas.

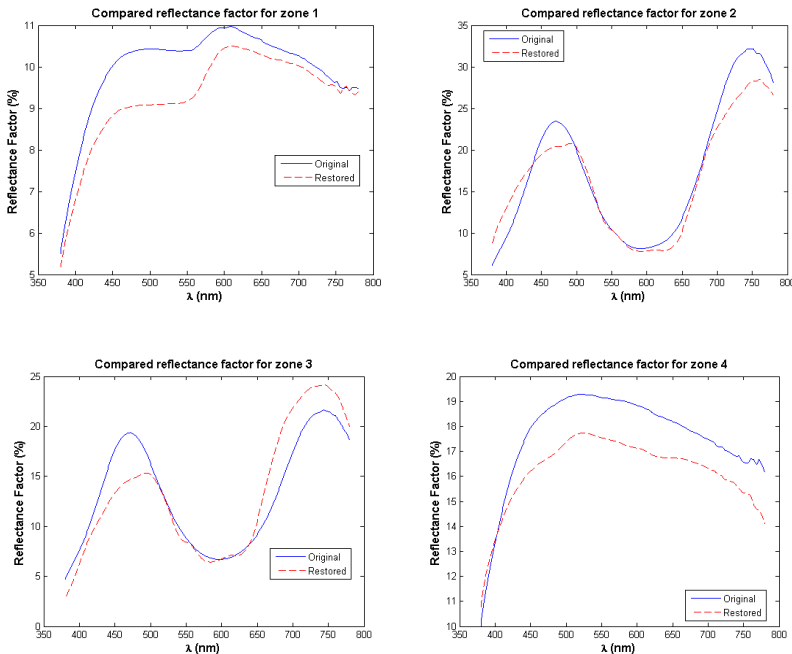


Figura 40: Factores de reflectancia medios medidos sobre las zonas originales (azul) y restauradas (rojo) en cada una de las zonas estudiadas. Fuente: [77]

4.2.2. Cálculos colorimétricos

Los cálculos colorimétricos se realizaron para el Observador Patrón CIE de 2°, y para cada iluminante de los propuestos como iluminantes patrón por la CIE, la tabla 7 muestra la correspondencia entre los iluminantes propuestos, los

números asignados para su representación gráfica y el tipo de fuente de iluminación que simula.

Nº ID	Nombre CIE	Tipo fuente	Nº ID	Nombre CIE	Tipo fuente
1	A	Incandescencia	15	FL3.2	Fluorescente
2	C	Luz día hemisferio norte	16	FL3.3	Fluorescente
3	D50	Luz día horizonte	17	FL3.4	Fluorescente
4	D65	Luz día mediodía	18	FL3.5	Fluorescente
5	D75	Luz cielo hemisferio norte	19	FL3.6	Fluorescente
6	FL10	Fluorescente Luz día	20	FL3.7	Fluorescente
7	FL1	Fluorescente B. frío	21	FL3.8	Fluorescente
8	FL2	Fluorescente Blanco	22	FL3.9	Fluorescente
9	FL3.10	Fluorescente B. cálido	23	HP1	Alta presión
10	FL3.11	Fluorescente	24	HP2	Alta presión
11	FL3.12	Fluorescente	25	HP3	Alta presión
12	FL3.13	Fluorescente	26	HP4	Alta presión
13	FL3.14	Fluorescente	27	HP5	Alta presión
14	FL3.1	Fluorescente			

Tabla 7: Correspondencia entre los números asignados a cada iluminante y los iluminantes patrón de la CIE. Fuente [77]

Para simular la influencia en la percepción visual de las distintas fuentes de iluminación para utilizar en la iluminación de la obra se calculó la diferencia de color en el espacio CIE $L^*a^*b^*$ ($\Delta E_{a^*b^*}$) entre las medidas tomadas en la zona original y las tomadas en la zona intervenida para todos los iluminantes mostrados en la tabla 7. Se considera que la diferencia de color es diferenciable por un observador a partir de 3 unidades $\Delta E_{a^*b^*}$ [27].

En general, las variaciones en la diferencia cromática entre las zonas originales y restauradas no fueron muy notables, salvo en la zona 2, en la que en función del iluminante seleccionado las diferencias cromáticas podrían diferenciarse o pasar inadvertidas. Los resultados obtenidos tras los cálculos se muestran en la figura 41.

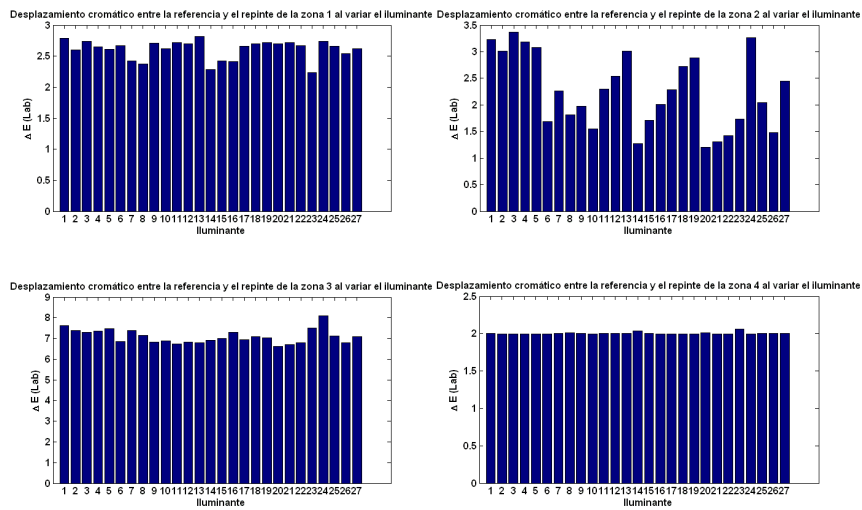


Figura 41: Diferencias cromáticas entre el área original y el área restaurada de cada una de las zonas medidas en función del iluminante utilizado.

4.3. Sistema de iluminación espectralmente selectivo aplicado en arte rupestre

La finalidad del trabajo que se describe a continuación fue encontrar una solución adecuada para la iluminación de una serie de pinturas rupestres basada en la optimización de la distribución espectral de las fuentes luminosas. Para minimizar los costes del proyecto de iluminación se utilizó una fuente LED de tres canales (RGB) para optimizar la visualización y minimizar el daño potencial sobre las pinturas. Además, para garantizar la idoneidad de la fuente propuesta, se realizaron ensayos de estabilidad de las condiciones medioambientales de la cueva, comprobándose que el uso de la fuente propuesta no influía ni en la proliferación de organismos vivos ni en el incremento de la temperatura de las pinturas rupestres.

Una cueva es una estructura con un equilibrio medioambiental muy frágil, pequeños cambios de humedad o temperatura, o la introducción de nuevos materiales en su interior puede causar una ruptura del equilibrio que afecte de manera drástica a la conservación de la misma [79]. Cuando existen pinturas rupestres en una cueva, mantener, en la medida de lo posible constantes los parámetros medioambientales del entorno es de vital importancia para prevenir el deterioro, pero es un problema muy complicado, sobre todo si la cueva permanece abierta al público.

Puesto que tanto el daño que una radiación produce sobre un bien de interés cultural (ecuación 4-2) como el color que percibe el ojo humano al verlo dependen de su factor de reflectancia, en primer lugar se realizó un proceso de caracterización espectral tanto de las pinturas a iluminar como de la piedra sobre la que se encuentran, utilizando las medidas espectrales realizadas, se llevó a cabo un análisis colorimétrico calculando el contraste entre el color de la piedra y el color de las pinturas utilizando como iluminantes fuentes de radiación de tipo cuerpo negro a temperaturas entre 1000K y 8000K, el contraste del color entre la piedra y el pigmento fue utilizado como variable en el algoritmo de optimización utilizado para conseguir la distribución espectral de la fuente ideal.

La distribución espectral óptima de la fuente de iluminación LED RGB se consiguió utilizando un algoritmo de búsqueda de mínimos en una función que dependía del daño potencial de la fuente (E_{dm}), del contraste entre el color de la pintura y el color de la piedra y de la diferencia del color de la pintura observada bajo el iluminante diseñado u observada bajo la fuente de iluminación que teóricamente utilizó el artista al pintar (una antorcha de grasa, que emite una radiación similar a un cuerpo negro a 1850K [80]).

Finalmente, utilizando la fuente de iluminación propuesta se realizó un estudio de proliferación de organismos vivos en el interior de la cueva y un análisis de la influencia de la fuente

propuesta en el incremento de la temperatura de las pinturas mediante termografía.

El trabajo se realizó en la cueva de El Castillo, en Puente Viesgo (Cantabria), que está incluida en la lista de Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO [5].

4.3.1. Caracterización espectral

Las medidas de caracterización espectral se llevaron a cabo en cuatro paneles distintos de arte rupestre. En cada uno de los paneles se midió el factor de reflectancia de las zonas con pigmento ($\rho_p(\lambda)$) y de las zonas del panel próximas a las pinturas en las que no había pigmento ($\rho_t(\lambda)$). La figura 43 muestra los cuatro paneles sobre los que se realizaron las medidas.

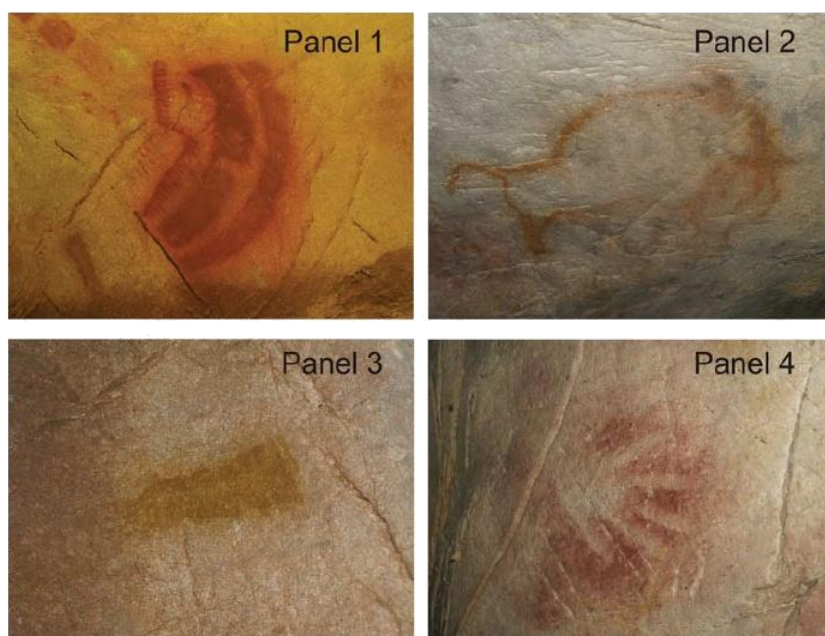


Figura 42: Paneles sobre los que se realizaron las medidas del factor de reflectancia.

Para el registro de las medidas se utilizó un espectrofotómetro de fibra óptica de la marca StellarNet, modelo EPP2000 UVN-SR. El rango de medida espectral de este instrumento con la rendija seleccionada en su configuración comprende desde 270 nm a 900 nm, pudiendo medir en intervalos de 0.5 nm. Como fuente de iluminación para las medidas se utilizó una lámpara halógena acoplada a un haz de siete fibras ópticas que están agrupadas alrededor de la fibra óptica que se utiliza para el registro espectral, de modo que la geometría de medida en este caso fue $45^\circ:0^\circ$.

La medida del blanco de referencia se realizó sobre un blanco patrón de la casa StellarNet, modelo RS50, que refleja el 99% de la radiación visible.

Para mantener constante la distancia entre el plano de medida y la fibra óptica se desarrolló un cabezal acoplado a la fibra que además permitía fijar la fibra correctamente en la mano o trípode utilizado para mantener la posición.

Para conseguir unas medidas precisas del factor de reflectancia medido de cada panel, se realizaron medidas en cinco zonas de cada panel. En cada una de las zonas se realizaron 10 medidas, de modo que el factor de reflectancia que se utilizó para los cálculos colorimétricos fue el factor de reflectancia promedio.

La figura 43 muestra los factores de reflectancia medidos sobre tres zonas en el panel número 1.

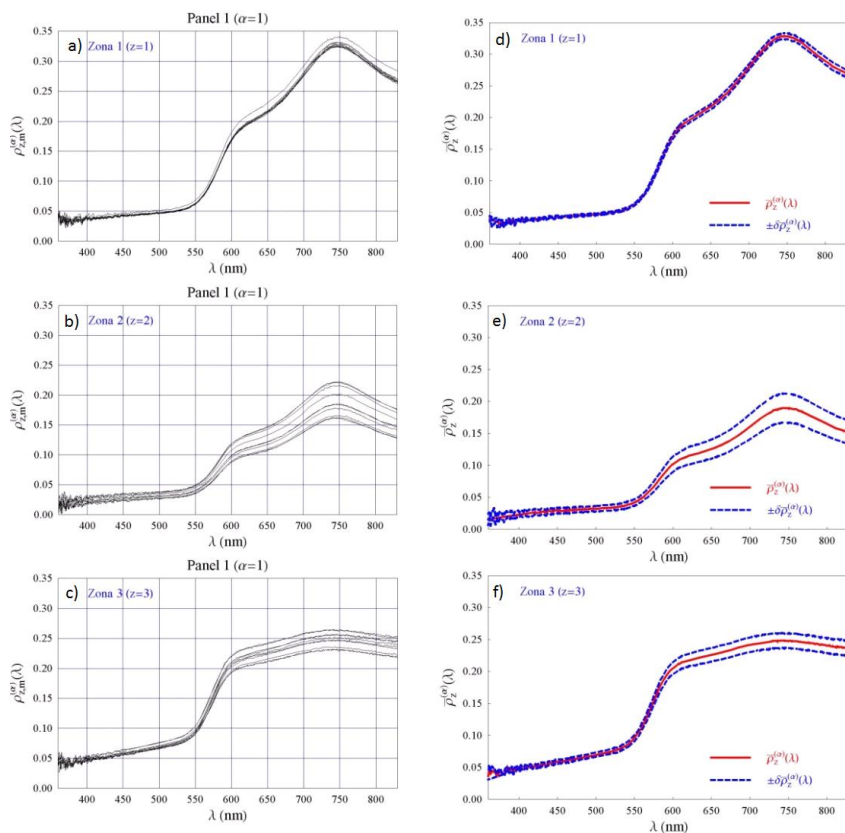


Figura 43: Factores de reflectancia medidos para tres zonas del Panel 1 (a, b y c), y factor de reflectancia medio para cada zona (d, e y f) (línea roja), con sus percentiles 5/95 (línea discontinua azul).

4.3.2. Análisis cromático

Para analizar el comportamiento cromático de las medidas de factor de reflectancia tomadas, se han calculado los valores triestímulo (X , Y , Z) de los factores de reflectancia medios de la todas zonas medidas sobre la piedra con pigmento y sin pigmento, utilizando el observador patrón CIE de 2° y con varias las fuentes de iluminación. Se han utilizado como fuente de iluminación para el cálculo la parte visible de la radiación emitida por fuentes tipo cuerpo negro a temperaturas comprendidas

entre los 1000K y los 8000K. La iluminancia de las fuentes que se utilizó para realizar los cálculos fue 40 lux.

Los valores cromáticos obtenidos representados en el diagrama cromático CIE 1931 que se ven en la figura 44 muestran la tendencia que presentan los valores obtenidos al variar el iluminante bajo el que son observados. El incremento de la temperatura de color se traduce en un desplazamiento desde los colores rojos percibidos utilizando iluminantes de temperaturas bajas hacia el centro del diagrama cromático (tonos más azulados).

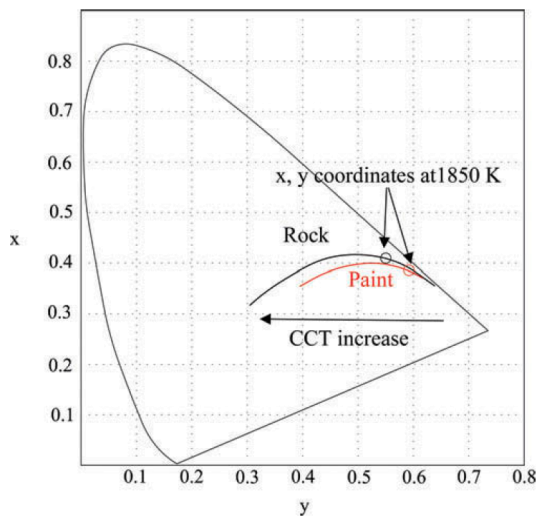


Figura 44: Variación del color de las medidas realizadas sobre la pintura y sobre la piedra al variar la temperatura de la fuente de iluminación.

Se han calculado las diferencias de color (ΔE_{a*b^*}) entre las zonas con y sin pigmento (a este valor se le ha llamado contraste cromático (d_{c-p})) calculando las coordenadas cromáticas de los valores triestímulo en el espacio de color *CIE L* a*b** para los

iluminantes tipo cuerpo negros entre 1000K y 8000K de temperatura. Los valores obtenidos se muestran en la figura 45, como se puede apreciar, el contraste entre la piedra y la pintura incrementa al aumentar la temperatura de color de la fuente de iluminación

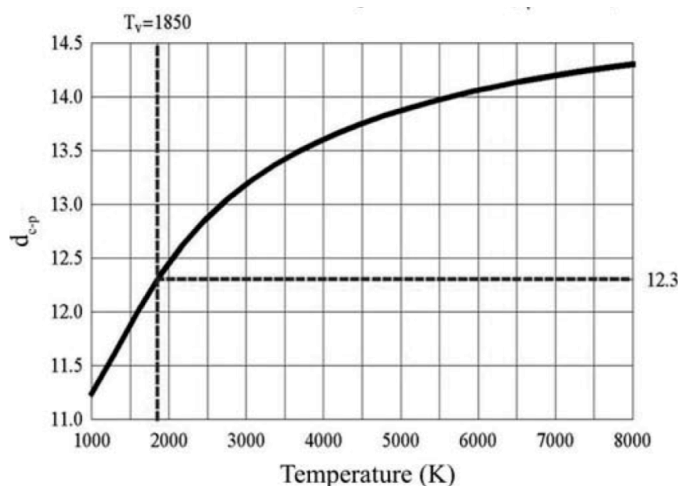


Figura 45: Contraste cromático calculado en el espacio de color $CIEL^*a^*b^*$ en función de la temperatura de un emisor tipo cuerpo negro con una iluminancia de 40 lux.

Uno de los criterios considerados a la hora de diseñar la iluminación fue utilizar una fuente de iluminación con una distribución espectral lo más parecida posible a la distribución espectral de la fuente original que utilizó el artista para realizar las pinturas. Para ello se consideró la fuente original un emisor tipo cuerpo negro a 1850K [80]. El valor del contraste cromático entre el color de la piedra y el del pigmento utilizando la fuente original es de 12.3 ($\Delta E_{a^*b^*}$). El factor de daño que causa la fuente original sobre la pintura, considerando la irradiancia efectiva que causa daño como valor del daño (E_{dm}), es $7.6 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$.

4.3.3. Análisis del daño potencial

Como se ha comentado, el daño que la radiación luminosa puede producir sobre los bienes culturales es un factor determinante a la hora de diseñar la iluminación, por lo que será la variable con un mayor peso en el algoritmo de optimización de la distribución espectral de la fuente que se proponga como solución.

Para evaluar el daño potencial de las fuentes de iluminación en función de su temperatura correlacionada de color (CCT), se ha calculado la irradiancia efectiva que causa daño (E_{dm}) de las distribuciones espectrales de los cuerpos negros entre 1000K y 8000K a una iluminancia de 40 lux. Para el cálculo de la responsividad espectral relativa de los pigmentos con los que se pintaron las pinturas rupestres ($D(\lambda)$) se ha utilizado un valor de la constante b de 0.0115, que es el mismo valor que el correspondiente a una pintura al óleo. La figura 46 muestra los resultados obtenidos, el radiador que emite una radiación con un menor potencial para causar daño sobre las pinturas rupestres es el que se encuentra a una temperatura de 2078K.

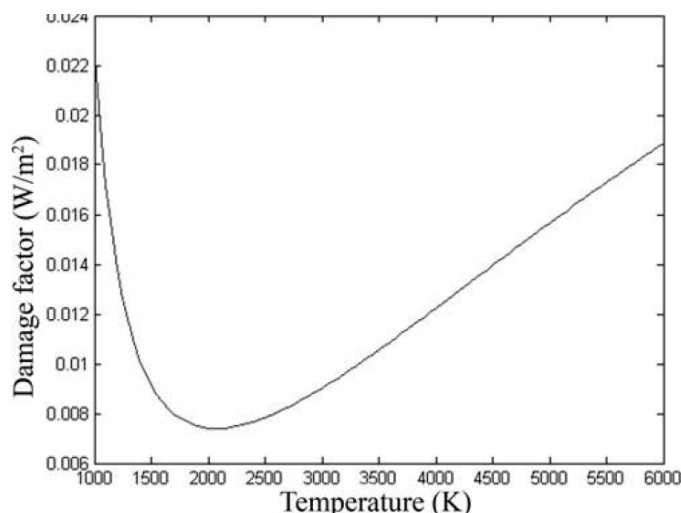


Figura 46: Factor de daño calculado en función de la temperatura de un emisor tipo cuerpo negro con una iluminancia constante de 40 lux.

Como muestra la figura 47, el mínimo potencial de daño se consigue a 2078K, las distribuciones espectrales emitidas por los emisores tipo cuerpo negro a temperaturas superiores van conteniendo cada vez más proporción de longitudes de onda cortas, que como se comentó en el segundo capítulo son más energéticas y por ende más dañinas. En el caso de los cuerpos negros a temperaturas por debajo de los 2000K, cada vez contienen menos proporción de su espectro de emisión en el espectro visible (emiten cada vez una mayor proporción de radiación infrarroja), por lo que para alcanzar los 40 lux de iluminancia necesitan una mayor energía radiante que produce un incremento del daño potencial.

4.3.4. Optimización de la distribución espectral

Para conseguir una flexibilidad suficiente para optimizar la distribución espectral de la fuente de iluminación el uso de fuentes de iluminación convencionales no es adecuado [73], [81]. Para poder alcanzar una solución de calidad para el problema planteado, se utilizó una fuente de iluminación basada en LED con tres canales sintonizables individualmente (RGB).

La distribución espectral ($S_L(\lambda)$) de la fuente de iluminación utilizada es la combinación lineal de las distribuciones espectrales de cada uno de los LED ($L_\beta(\lambda)$) pesada por un factor (K_β) que determina la proporción de radiación que aporta cada uno de los LED al espectro total. La ecuación (4-6) describe la distribución espectral de la fuente utilizada.

$$S_L(\lambda) = \sum_{\beta=1}^3 K_\beta L_\beta(\lambda), \quad (4-6)$$

donde β toma valor 1 para el LED rojo, 2 para el LED verde y 3 para el LED azul.

El algoritmo de optimización utilizado para conseguir la distribución espectral que más se ajustase a las necesidades específicas del caso de aplicación utilizaba tres parámetros encontrar la solución idónea:

- Daño potencial del iluminante sobre las pinturas (E_{dm}): Este parámetro se calculó utilizando las ecuaciones (4-2) y (4-3) para la distribución espectral calculada en función

de los parámetros K_β . El valor de la constante b que se utilizó fue 0.0115.

- Contraste cromático entre los pigmentos y la piedra (d_{cp}): Calculado en el espacio $CIE L^*a^*b^*$ para los factores de reflectancia medios iluminados con la distribución espectral de la fuente calculada en función de K_β .
- Distancia cromática entre el color del pigmento iluminado con el iluminante original con el que se pintó o con el iluminante propuesto (d_a): Calculada en el espacio $CIE L^*a^*b^*$ para el factor de reflectancia medio del pigmento iluminado con un cuerpo negro a 1850K o con la distribución espectral de la fuente LED calculada en función de K_β .

Para la optimización se utilizó un algoritmo que buscaba los mínimos de una función que dependía de los tres parámetros que se han mencionado. En función del peso que la función diera a cada uno de los tres parámetros que se utilizaron, el algoritmo encontraría una solución en la que primara uno u otro parámetro. Para ofrecer dos soluciones distintas al personal encargado de la conservación de las pinturas rupestres, se utilizaron dos funciones distintas en las que se daban distintos pesos a los parámetros de optimización. Así, en ambas funciones el daño potencial, era el parámetro más importante y debía ser mínimo, el contraste cromático entre el pigmento y la piedra era algo menos importante y debía ser máximo para mejorar la visibilidad de la

pintura y la distancia cromática con el color visto iluminado con el iluminante original era el parámetro menos importante. Las ecuaciones (4-7) y (4-8) describen las funciones que se utilizaron en la optimización de la distribución espectral de la fuente.

$$F_1(E_{dm}, d_{c-p}, d_a) = (E_{dm})^2 - (d_{c-p}) + \sqrt{d_a}, \quad (4-7)$$

$$F_2(E_{dm}, d_{c-p}, d_a) = 2E_{dm} - (d_{c-p}) + d_a. \quad (4-8)$$

La figura 47 muestra la relación entre los valores de los parámetros K_1 , K_2 y los valores totales de las funciones.

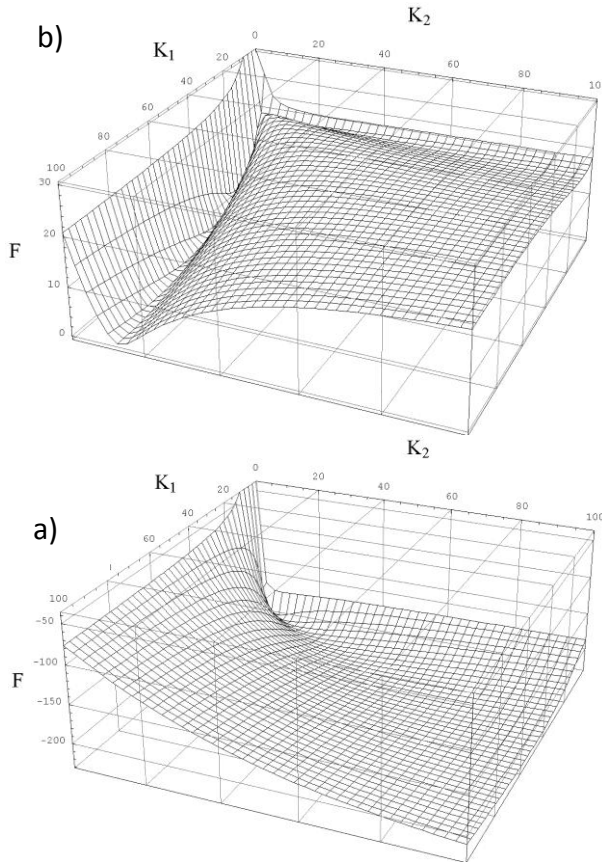


Figura 47: Valores de las funciones F_1 (a) y F_2 (b) en función de los valores de K_1 y K_2 .

Los valores de los parámetros K_β que se obtenían un valor mínimos de las funciones F_1 y F_2 fueron los siguientes:

- F_1 : $K_1 = 4$, $K_2 = 10$, $K_3 = 1$. Con estos parámetros se conseguía un valor de daño $E_{dm} = 4.6 \text{ W/m}^2$, un valor de contraste $d_{c-p}=15.9 (\Delta E_{a*b*})$ y una diferencia de color con el iluminante original $d_a = 23.8 (\Delta E_{a*b*})$ para una iluminancia de 40 lux.
- F_2 : $K_1 = 31$, $K_2 = 4$, $K_3 = 0$. Con estos parámetros se conseguía un valor de daño $E_{dm} = 4.0 \text{ W/m}^2$, un valor de contraste $d_{c-p}=11.5 (\Delta E_{a*b*})$ y una diferencia de color con el iluminante original $d_a = 3.3 (\Delta E_{a*b*})$ para una iluminancia de 40 lux.

Las distribuciones espectrales de los iluminantes calculados con las dos funciones para una iluminancia de 40 lux se muestran en la figura 48.

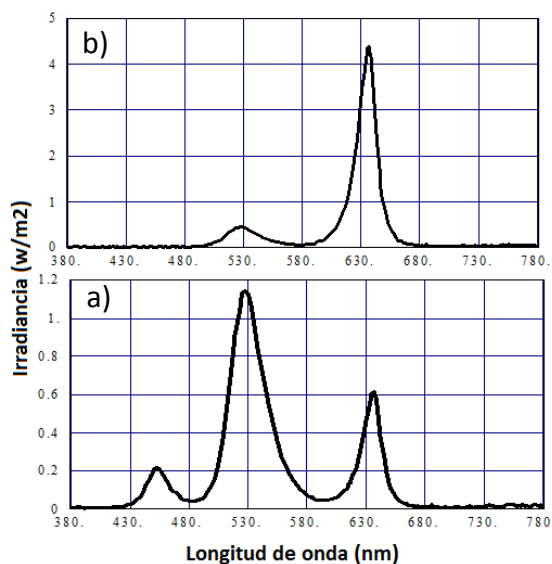


Figura 48: Distribuciones espectrales calculadas para F_1 (a) y F_2 (b)

Como se puede deducir al observar la curva, el iluminante obtenido al minimizar la función F_2 es mucho más cálido que el que se obtiene minimizando la función F_1 . En el primer caso el color obtenido para el pigmento es prácticamente igual al que se obtendría iluminando con una antorcha ($d_a = 3.3$) y el contraste entre el pigmento y la piedra es apreciable ($d_{c-p} = 11.5$). El iluminante que se consigue utilizando la función F_2 presenta un tono mucho más verdoso. En este caso el estímulo de color obtenido para el pigmento difiere sustancialmente del que se obtendría iluminando con una antorcha ($d_a = 23.8$) y el contraste es mayor que con el primer iluminante ($d_{c-p} = 15.9$). El daño que se produce sobre la pintura es muy parecido en los dos casos.

La solución que fue elegida por el personal responsable de la exposición y conservación de la pintura fue la obtenida utilizando la función F_2 .

4.3.5. Test de proliferación de organismos vivos

Uno de los principales problemas con la iluminación en el interior de cuevas es la proliferación de organismos vivos, principalmente hongos y algas, que ven en la radiación proveniente de las fuentes artificiales una fuente de energía ideal para crecer. Utilizando la fuente de iluminación diseñada con la distribución espectral que se seleccionó para la iluminación de las pinturas rupestres, se realizó un ensayo en una zona de la cueva en la que no existía riesgo de contaminación de las pinturas. El ensayo se realizó manteniendo encendida la fuente de

iluminación 24 h al día durante un año incidiendo con una iluminancia de 40 lux sobre una de las paredes de la cueva. Un equipo de restauradores especializados realizó un estudio sobre la proliferación de hongos y algas en la zona en la que se realizó el test [82]. Encontrando que “se comprueba que ni en los alrededores de la fijación ni en el área iluminada directamente se encontraron organismos vivos visibles a escala macroscópica”.

La figura 49 muestra el aspecto de la fuente de iluminación durante el test realizado.

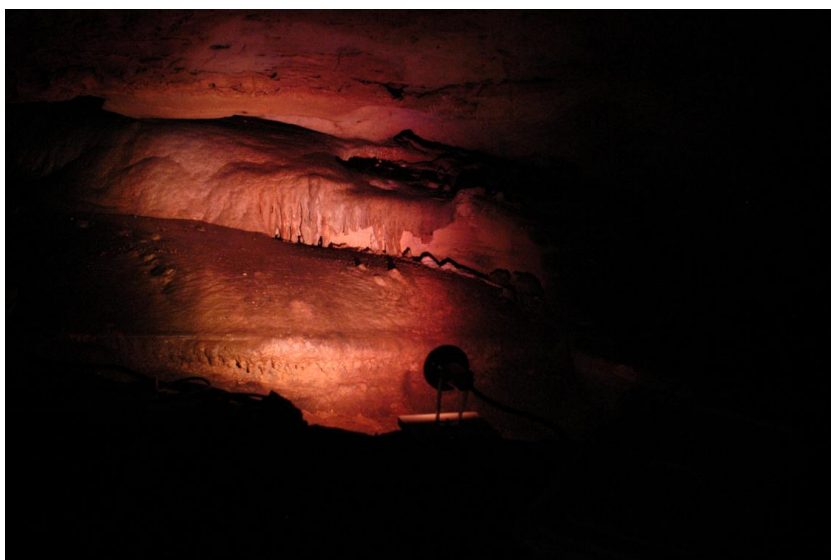


Figura 49: Montaje realizado para el test de proliferación de organismos vivos.

4.3.6. Estudio de la estabilidad térmica

Para finalizar el trabajo, se realizó un análisis de la influencia de la fuente de iluminación diseñada en la temperatura de la superficie iluminada. Para ello se colocó la fuente de

iluminación en un punto fijo iluminando uno de los paneles con una iluminancia de 40 lux. Las medidas de temperatura se tomaron utilizando una cámara termográfica FLIR A325. La cámara termográfica estuvo registrando imágenes térmicas del área iluminada durante seis horas.

El análisis de las imágenes termográficas se realizó utilizando la “toolbox” de Matlab® “Image Processing Toolbox”.

Se concluyó que la temperatura media de la superficie durante las seis horas que duró el ensayo fue de 12.75 °C y la desviación estándar de los datos fue de 0.07 °C. Por lo que la influencia de la iluminación en la temperatura de la superficie sobre la que estaban situadas las pinturas rupestres es mínima.

La figura 50 muestra el montaje experimental que se utilizó para el estudio de la estabilidad térmica.



Figura 50: Montaje experimental de la cámara termográfica utilizado para el estudio [83].

*“Lo mismo es nuestra vida que una comedia
no se atiende a si es larga, sino a si la han representado bien.*

Concluye donde quieras, con tal de que pongas buen final”

Lucio Anneo Séneca

5. Conclusiones

El objetivo general de los trabajos de investigación llevados a cabo durante la realización de esta tesis doctoral viene determinado por la necesidad actual de mejoras en los sistemas de iluminación aplicados a bienes de interés cultural. Para conseguir dichas mejoras se han estudiado las particularidades de la iluminación de bienes culturales, se ha desarrollado una metodología de caracterización óptica de precisión de bienes culturales y se ha implementado una metodología para la optimización de las fuentes de iluminación que permite mejorar las condiciones de exhibición de los mismos. Los resultados de la investigación realizada han sido aplicados en cuatro casos prácticos de enorme interés debido a la importancia patrimonial y cultural de los mismos, como es el caso de las obras “*Guernica*” y “*Mujer en Azul*”, del pintor Pablo Picasso, la obra “*Muchacho con turbante y ramillete*” de Michiel Sweerts o las pinturas rupestres de la Cueva del Castillo, incluida en la lista del Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO desde 2008.

1. Se ha desarrollado una metodología de caracterización óptica de bienes de interés cultural basada en la medida precisa del factor de reflectancia. Se ha integrado la metodología de caracterización óptica en distintos sistemas de posicionamiento para garantizar no sólo una alta precisión en

las medidas espectrales sino también una alta precisión en el posicionamiento del área de medida.

2. Se ha aplicado la metodología desarrollada en la caracterización espectral y espacial de obras de arte de especial relevancia ("*Guernica*" y "*Mujer en Azul*"), y se ha generado una base de datos para poder realizar un seguimiento de la evolución temporal de las mismas. Sobre ésta base de datos se han aplicado técnicas de análisis estadístico multivariable (Análisis de Componentes Principales), que permiten por un lado utilizar las medidas espectrales como herramienta de evaluación objetiva de procesos de restauración y por otro simplificar la interpretación de los datos espectrales en medidas futuras para evaluar la evolución temporal del estado de conservación de la obra de arte.
3. Se ha desarrollado una metodología de optimización de la distribución espectral de fuentes de iluminación aplicadas a bienes culturales, la optimización está basada en criterios de conservación y percepción que pueden variar en función de las necesidades específicas de cada caso de aplicación. La metodología permite asignar distinta importancia a los diferentes parámetros a optimizar de modo que hace posible encontrar soluciones individualizadas para problemas específicos. Se ha aplicado dicha metodología en la iluminación de arte rupestre en la cueva de "El Castillo" (Puente Viesgo), incluida desde 2008 en la lista de Patrimonio

de la humanidad de la UNESCO con el nombre: “Cueva de Altamira y arte rupestre paleolítico del norte de España”.

4. Se han caracterizado espectralmente zonas originales y restauradas similares en color, de la obra “*Muchacho con turbante y ramillete de flores*” de Michiel Sweerts, perteneciente a la colección Thyssen-Bornemisza y se han calculado las diferencias cromáticas entre metámeros bajo distintas fuentes de iluminación. El resultado ha sido de utilidad a la hora de diseñar la iluminación de la sala en la que se expone la obra.
5. Se ha desarrollado un sistema de iluminación específico para un grupo de pinturas rupestres en la cueva de El Castillo. El sistema de iluminación consta de tres fuentes LED (RGB) que emiten una distribución espectral óptima en cuanto a un mínimo deterioro ($E_{dm} = 4.0 \text{ W/m}^2$), máximo contraste entre el estímulo de color y el fondo ($d_{c-p}=11.5 (\Delta E_{a*b*})$) y mínima diferencia cromática entre la pintura observada bajo la luz que utilizó el autor y observada con el iluminante desarrollado $d_a= 3.3 (\Delta E_{a*b*})$.

Publicaciones generadas

Artículos

- [44] J. Torres Arjona, D. Vázquez, T. Antelo, J. M. Menéndez, A. Posse, A. Álvarez, J. Muñoz de Luna, C. Vega y M. del Egido, «Adquisición y formación de imágenes multiespectrales de obras pictóricas,» *Óptica Pura y Aplicada*, vol. 45, nº 2, pp. 201-207, 2012.

- [45] J. Muñoz de Luna, A. Álvarez, D. Vázquez, M. Melgosa, H. Durán, J. García y C. Muro, «Accurate Measurements of Spectral Reflectance in Picasso's Guernica Painting,» *Applied Spectroscopy*, vol. 70, nº 1, pp. 1-9, 2016.

- [83] J. Muñoz de Luna, D. Vázquez Moliní, A. Álvarez Fernández-Balbuena, Á. García Botella, J. A. Herraiz y R. Ontañón, «Selective Spectral LED Lighting System Applied in Paleolithic Cave Art,» *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, vol. 11, nº 4, pp. 223-230, 2015.

Congresos

- [49] D. Vázquez-Moliní, J. Muñoz de Luna, A. Álvarez Fernández-Balbuena y J. Zoido Chamorro, «Advanced IR Light projector for painting analysis,» de *In situ technical imaging for art and archaeology: A symposium in conservation science*, The British museum (Londres), 2010.

- [76] A. Sánchez Ortiz y e. al., «Investigación sobre la estabilidad química y óptica de materiales contemporáneos para la reintegración cromática,» de Procedimientos del IV Congreso del GEIC, Madrid, 2009.

- [77] D. Vázquez, J. Muñoz de Luna, A. Álvarez, A. Sánchez y U. Sedano, «Study of chromatic variations between metameres by vaying lighting in the painting "Boy in a turban holding a nosegay" by Michiel Sweerts,» de Proceedings of SPIE 8550 Optical Systems Design 2012, Barcelona, 2012.

- [50] J. Muñoz de Luna, D. Vázquez, A. Álvarez, P. Calopa, A. Iruretagoyena, C. Muro y J. García, «Colorimetric and spectral characterization of interest areas in the restoring process of "Woman in blue" painting from Picasso,» de X Congreso Nacional de Color, Valencia, 2013.

Lista de figuras

<i>Figura 1: Detalle del techo de los policromos, perteneciente a la cueva de Altamira.</i>	6
<i>Figura 2: Muestras reflectoras de la carta Munsell (a) y muestras adicionales utilizadas para los cálculos de la escala CQS (b). Fuente Davis, Yohno [17]</i>	15
<i>Figura 3: Ángulos de colocación recomendados para evitar el deslumbramiento. Fuente G.Thomson [10]</i>	17
<i>Figura 4: Representación gráfica de los campos eléctrico y magnético que componen una onda electromagnética.</i>	26
<i>Figura 5: Absorbancia espectral normalizada de los cuatro tipos de fotorreceptores existentes en la retina humana.</i>	29
<i>Figura 6: Espectro electromagnético con un detalle de la región visible.</i>	29
<i>Figura 7: Esquema de la radiación reflejada que permite la visión de un material.</i>	33
<i>Figura 8: Funciones $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ y $b(\lambda)$ de igualación de color obtenidas en los experimentos de Wright y Guild. Fuente Georg A. Klein [32]</i>	37
<i>Figura 9: Distribución en retina de conos (cones) y bastones (rods). Fuente: Goldstein [23].</i>	38
<i>Figura 10: Funciones estándar de igualación de color establecidas en 1931 por la CIE. Fuente: Y. Ohno [29].</i>	39
<i>Figura 11: Distribución espectral normalizada de cuatro de los iluminantes patrón propuestos por la CIE.</i>	42
<i>Figura 12: Esquema de funcionamiento de un espectralradiómetro de red de difracción con entrada de fibra</i>	43
<i>Figura 13: Esquema de los distintos tipos de reflectancia que muestran las superficies reflectantes. Fuente: Teledet</i>	45
<i>Figura 14: Diagrama cromático CIE x,y de 1931.</i>	50
<i>Figura 15: Diagrama cromático CIE x, y de 1931 sobre el que se han representado las elipses aproximadas por Macadam que representa 10</i>	

<i>veces el valor de diferencia cromática mínimamente diferenciable en cada región del diagrama cromático.</i>	51
<i>Figura 16: Visualización tridimensional del espacio de color CIE $L^*a^*b^*$.</i>	
<i>Fuente: Fairchild [15].</i>	53
<i>Figura 17: Dibujo del sistema de medida automatizado que se utilizó.</i>	
<i>Fuente: N. Catalán con modificaciones [45].</i>	68
<i>Figura 18: Distribución espectral del sistema de iluminación desarrollado para la medida del factor de reflectancia.</i>	70
<i>Figura 19: Sistema de iluminación diseñado. En la parte izquierda de la figura (a) se pueden apreciar los dos tipos de fuentes utilizadas. La parte derecha de la figura (b) muestra el sistema de medida desarrollado en funcionamiento.</i>	71
<i>Figura 20: Topografía medida sobre la obra asumiendo el sistema de posicionamiento como un plano perfecto. El mapa de color identifica la distancia en mm medida desde el sistema de posicionamiento.</i>	72
<i>Figura 21: Imagen del punto de medida tomada por el sensor CCD acoplado en el ocular del espectroradiómetro.</i>	73
<i>Figura 22: Autovalor de cada una de las componentes principales obtenidas a la covarianza de los datos.</i>	76
<i>Figura 23: Autovectores de las cinco primeras componentes calculadas, que contienen el 99.97% de la información de la covarianza de los factores de reflectancia.</i>	77
<i>Figura 24: Valores de factor de reflectancia medio en cada uno de los puntos medidos.</i>	78
<i>Figura 25: Histograma de los valores medios de factor de reflectancia.</i>	79
<i>Figura 26: Factores de reflectancia promedio (línea continua) y curvas de percentil 5/95 (líneas discontinuas) para cuatro de los intervalos estudiados.</i>	80
<i>Figura 27: Coordenadas cromáticas J, a_c y b_c para los 19 intervalos estudiados.</i>	81

<i>Figura 28: Ajuste de los datos que describen la variación cromática en función del factor de reflectancia medio.</i>	84
<i>Figura 29: Esquema del sistema de iluminación tipo Köhler utilizado.</i>	89
<i>Figura 30: Imagen de uno de los puntos sobre los que se realizan las medidas.</i>	90
<i>Figura 31: Posición de la matriz rectangular de puntos medidos sobre la obra.</i>	93
<i>Figura 32: Transmitancias espectrales (tanto por uno) de la capa retirada tras la restauración para los 140 puntos medidos (líneas azules). Transmitancia media equivalente (en rojo) con las curvas de percentil 5/95 (negro discontinuo)</i>	94
<i>Figura 33: Coordenadas cromáticas calculadas para la capa retirada en el proceso de restauración</i>	95
<i>Figura 34: Distribución espectral correspondiente a la primera componente principal antes (línea azul) y después (línea roja) del proceso de restauración (a). Las líneas discontinuas muestran las curvas de percentil 5/95 correspondientes. A la derecha se representa la importancia del pseudo-espectro en las distintas regiones del cuadro antes (b) y después del proceso de restauración (c).</i>	97
<i>Figura 35: Distribución espectral correspondiente a la segunda componente principal antes (línea azul) y después (línea roja) del proceso de restauración (a). Las líneas discontinuas muestran las curvas de percentil 5/95 correspondientes. A la derecha se representa la importancia del pseudo-espectro en las distintas regiones del cuadro antes (b) y después del proceso (c).</i>	98
<i>Figura 36: Escala logarítmica de luminancias a las que se produce la adaptación del ojo humano. Fuente: Crawford [57]</i>	104
<i>Figura 37: Muestras de la escala Blue Wool antes y después de un ensayo de fotorresistencia.</i>	108
<i>Figura 38: Esquema del montaje utilizado para caracterización espectral en el caso de aplicación.</i>	120

<i>Figura 39: Zonas sobre las que se han realizado las medidas marcadas sobre una imagen en el espectro visible (derecha) y otra imagen en el espectro UV. Fuente [72].</i>	121
<i>Figura 40: Factores de reflectancia medios medidos sobre las zonas originales (azul) y restauradas (rojo) en cada una de las zonas estudiadas. Fuente: [72]</i>	122
<i>Figura 41: Diferencias cromáticas entre el área original y el área restaurada de cada una de las zonas medidas en función del iluminante utilizado.</i>	124
<i>Figura 43: Paneles sobre los que se realizaron las medidas del factor de reflectancia.</i>	127
<i>Figura 43: Factores de reflectancia medidos para tres zonas del Panel 1 (a, b y c), y factor de reflectancia medio para cada zona (d, e y f) (línea roja), con sus percentiles 5/95 (línea discontinua azul).</i>	129
<i>Figura 44: Variación del color de las medidas realizadas sobre la pintura y sobre la piedra al variar la temperatura de la fuente de iluminación.</i>	130
<i>Figura 45: Contraste cromático calculado en el espacio de color CIEL*a*b* en función de la temperatura de un emisor tipo cuerpo negro con una iluminancia de 40 lux.</i>	131
<i>Figura 46: Factor de daño calculado en función de la temperatura de un emisor tipo cuerpo negro con una iluminancia constante de 40 lux.</i>	133
<i>Figura 47: Valores de las funciones $F_1(a)$ y $F_2(b)$ en función de los valores de K_1 y K_2.</i>	136
<i>Figura 48: Distribuciones espectrales calculadas para $F_1(a)$ y $F_2(b)$</i>	137
<i>Figura 49: Montaje realizado para el test de proliferación de organismos vivos.</i>	139
<i>Figura 50: Montaje experimental de la cámara termográfica utilizado para el estudio.</i>	140

Lista de tablas

<i>Tabla 1: Clasificación en cuatro categorías de los materiales de acuerdo con la sensibilidad a la luz visible. Fuente CIE 157:2004 [9]</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 2: Límites de iluminancia y exposición anual límite recomendados por la normativa. Fuente CIE 157:2004 [9]</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 3: Parámetros de entrada para CIECAM02 en función del entorno.</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 4: Parámetros del ajuste en dos pasos.</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 5: Valores de exposición que probablemente causen una variación en el color del pigmento. Fuente CIE 157:2004 [9]</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 6: Valores del umbral de exposición radiante efectiva y de la constante α en función del tipo de material. Fuente: CIE 157:2004 [9]</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 7: Correspondencia entre los números asignados a cada iluminante y los iluminantes patrón de la CIE. Fuente [67]</i>	<i>123</i>

Bibliografía

- [1] Conferencia General de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la, «Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural,» Noviembre 1972. [En línea]. Available: <http://whc.unesco.org/archive/convention-es.pdf>.

- [2] A. Dachary y S. Burne, «Globalización y turismo ¿Dos caras de una misma moneda?,» *Estudios y perspectivas en turismo*, nº 3, pp. 3-4, 2004.

- [3] Conferencia ministerial euromediterránea, «Declaración final de la Conferencia ministerial euromediterránea de Barcelona de los días 27 y 28 de noviembre de 1995 y su plan de trabajo,» de *Actas de la Conferencia ministerial euromediterránea de Barcelona*, Barcelona, 1995.

- [4] Instituto Nacional de Estadística (INE), «España en Cifras 2014,» 2014. [En línea]. Available: http://www.ine.es/prodyser/espa_cifras/2014/files/assets/basic-html/page51.html. [Último acceso: 14 04 2015].

- [5] UNESCO, «Properties inscribed on the World Heritage List,» [En línea]. Available: <http://whc.unesco.org/en/statesparties/es>. [Último acceso: 16 04 2015].

- [6] *LEY 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español*, 1985.
- [7] M. P. G. Cuetos, *El patrimonio cultural, conceptos básicos*, Zaragoza: Prensas Universitarias Universidad Zaragoza, 2012.
- [8] Ministerio de Cultura de España, «Plan Nacional de Conservación Preventiva,» Marzo 2011. [En línea]. Available: http://www.mcu.es/patrimonio/docs/MC/IPHE/Novedades/PN_CONSERVACION_PREVENTIVA.pdf. [Último acceso: 16 04 2015].
- [9] International Commission on Illumination (CIE), «CIE 157:2004 Control of Damage to Museum Objects by Optical Radiation,» CIE, Manchester, 2004.
- [10] G. Thomson, *The Museum Environment*, Oxford: United Kingdom, 1978.
- [11] F. F. Arana S., *Una metodología de selección de iluminantes y diseño de la distribución espectral de fuentes lumínicas para la adecuada exhibición y preservación de obras de arte en museos*, Terrassa: Universidad Politécnica de Cataluña, 2014.
- [12] S. Aydinli, E. Krochmann, G. S. Hilbert y J. Krochmann, «On the deterioration of Exhibited Museum Objects by Optical Radiation,» *CIE Publication, Technical Collection*, vol. 89, pp. 25-36, 1990.

- [13] D. Saunders y J. Kirby, «Light-induced damage: investigating the reciprocity principle,» de *ICOM Committee for Conservation triennial meeting (11)*, Edinburgh, Scotland, 1996.
- [14] M. D. Fairchild, *Color Appearance Models*, The Atrium, Southern Gate, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [15] International Commission of Illumination (CIE), «C. I. E. 15: 2004 Colorimetry,» CIE Central Bureau, Vienna, 2004.
- [16] W. Davis y Y. Ohno, «Color quality scale,» *Optical Engineering*, vol. 49 (3), 2010.
- [17] Real Academia Española, «Diccionario de la Real Academia Española. 23ª edición,» Real Academia Española, Madrid, 2014.
- [18] International Commission on Illumination (CIE), «CIE equations for disability glare,» *Color Research & Application*, vol. 27, nº 6, pp. 457-458, 2002.
- [19] J. Miller, «Museum lighting-pure and simple,» 2005. [En línea]. Available: <http://www.nouvir.com/pdfs/MuseumLighting.pdf>. [Último acceso: 25 06 2015].
- [20] P. G. Huray, *Maxwell's equations*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [21] J. M. Miralles, *La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales*, S. Gandía y J. Meliá, Edits., Valencia: Universitat de València, 1991.

- [22] E. B. Goldstein, *Sensation and Perception*. 8 Ed., Belmont, USA: Wadsworth, 2010.
- [23] E. D. Olsen, *Métodos Ópticos de Análisis*, Barcelona: Reverté, 1990.
- [24] T. T. Schaeffer, *Effects of Light on Materials in Collections. Data on Photoflash and Related Sources*, Los Angeles: The J. Paul Getty Trust, 2001.
- [25] R. L. Feller, *Accelerated Aging. Photochemical and Thermal Aspects*, Ann Arbor, Michigan: The J. Paul Getty Trust, 1994.
- [26] S. Michalski, «Canadian Conservation Institute. Agent of Deterioration: Light, Ultraviolet and Infrared,» 09 06 2013. [En línea]. Available: <https://www.cci-icc.gc.ca/resources-ressources/agentsofdeterioration-agentsdedeterioration/chap08-eng.aspx>. [Último acceso: 23 07 2015].
- [27] J. Schanda, *Colorimetry. Understanding CIE system*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [28] Y. Ohno, «CIE fundamentals for color measurements,» *NIP & Digital Fabrication Conference. Society for Imaging Science and Technology*, vol. Vol. 2000, nº 2, 2000.
- [29] W. Wright, «A re-determination of the mixture curves of the spectrum,» *Transactions of the Optical Society of London*, vol. 31, 1929-1930.

- [30] J. Guild, «The colorimetric properties of the spectrum,» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. Serie A, nº 230, 1931.
- [31] G. A. Klein, *Industrial Color Physics*, Herrenbeg: Springer, 2010.
- [32] International Commission on Illumination (CIE), «CIE 15:3:2004 Colorimetry,» Commission Internationale de L'Eclairage, Vienna, 2004.
- [33] International Lighting Commission (CIE), «CIE Standard S 014-2E:2006 CIE Standard Illuminants,» CIE, Vienna, 2006.
- [34] W. L. Wolfe, *Introduction to Radiometry*, Bellingham: SPIE, 1998.
- [35] D. Macadam, «Visual sensitivities to color differences in daylight,» *Journal of the Optical Society of America*, vol. 32, pp. 247-274, 1942.
- [36] J. M. Zoido, F. Carreño y E. Bernabeu, «On MacAdam' s ellipses,» *Optica Pura y Aplicada*, vol. 29, pp. 81-108, 1996.
- [37] International Commission of Illumination (CIE), «CIE 159:2004 A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02,» CIE, Viena, 2004.

- [38] M. Bacci, A. Casini, C. Cucci y M. Vervat, «Non-invasive spectroscopic measurements on the Il ritratto della figliastra by Giovanni Fattori: identification of pigments and colourimetric analysis,» *Journal of Cultural Heritage* , vol. 4, nº 4, pp. 329-336, 2003.
- [39] M. Bacci, F. Baldini, R. Carlà, R. Linari, M. Picollo y B. Radicati, «Color Analysis of the Brancacci Chapel Frescoes: Part II,» *Applied Spectroscopy*, vol. 47, pp. 399-402, 1993.
- [40] M. Bacci, V. Cappellini y R. Carla, «Diffuse reflectance spectroscopy: an application to the analysis of art works,» *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 1, nº 1, p. 132, 1987.
- [41] N. Tsumura, Y. Miyake y V. Bochko, «Spectral Color Imaging System for Estimating Spectral Reflectance of Paint,» *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 51, pp. 70-78, 2007.
- [42] R. S. Berns y F. H. Imai, «The use of multi-channel visible spectrum imaging for pigment identification,» de *Proc. 13th triennial ICOM-CC meeting*, Rio de Janeiro, 2002.
- [43] S. Baronti, «Multispectral Imaging System for the Mapping of Pigments in Works of Art by use of Principal-Component Analysis,» *Applied Optics*, vol. 37, nº 8, pp. 1299-1309, 1998.

- [44] J. Torres Arjona, D. Vázquez, T. Antelo, J. M. Menéndez, A. Posse, A. Álvarez, J. Muñoz de Luna, C. Vega y M. del Egido, «Adquisición y formación de imágenes multiespectrales de obras pictóricas,» *Óptica Pura y Aplicada*, vol. 45, nº 2, pp. 201-207, 2012.
- [45] J. Muñoz de Luna, A. Álvarez, D. Vázquez, M. Melgosa, H. Durán, J. García y C. Muro, «Accurate Measurements of Spectral Reflectance in Picasso's Guernica Painting,» *Applied Spectroscopy*, vol. 70, nº 1, pp. 1-9, 2016.
- [46] E. Fernández-Santos, «El robot que destripa el 'Guernica',» *El País*, 07 02 2012.
- [47] J. M. LOPEZ-ALONSO y J. ALDA, «Characterization of hyperspectral imagers and scenes: background and equipment artifacts,» de *Proc. of SPIE. European Symposium on Optics and Photonics for Defence and Security.*, Stockholm, 2004.
- [48] J. M. López-Alonso, J. Alda y E. Bernabéu, «Principal-component characterization of noise for infrared images,» *Applied Optics*, vol. 41, nº 2, pp. 320-331, 2002.
- [49] D. Vázquez-Moliní, J. Muñoz de Luna, A. Álvarez Fernández-Balbuena y J. Zoido Chamorro, «Advanced IR Light projector for painting analysis,» de *In situ technical imaging for art and archaeology: A symposium in conservation science*, The British museum (Londres), 2010.

- [50] J. Muñoz de Luna, D. Vázquez, A. Álvarez, P. Calopa, A. Iruretagoyena, C. Muro y J. García, «Colorimetric and spectral characterization of interest areas in the restoring process of "Woman in blue" painting from Picasso,» de *X Congreso Nacional de Color*, Valencia, 2013.
- [51] International Commission of Illumination (CIE), «Selected Colorimetric Tables,» [En línea]. Available: http://www.cie.co.at/index.php/LEFTMENU/index.php?i_ca_id=298. [Último acceso: 2011 07 20].
- [52] S. Keene, *Managing conservation in museums*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [53] S. Michalski, «Towards specific lighting guidelines,» de *9th Triennial Meeting. ICOM Committee on Conservation*, Dresden, 1990.
- [54] Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), *Museum and Art Gallery Lighting: A Recommended Practice*, New York: Illuminating Engineering Society (IES), 1996.
- [55] C. Cuttle, *Light for Art's Sake: Lighting for Artworks and Museum Displays*, Oxford: Elsevier, 2007.
- [56] S. Michalski, «The lighting decision,» de *Fabric of an Exhibition, Preprints of Textile Symposium 97*, Ottawa, 1997.

- [57] B. Crawford, «Just perceptible colour differences in relation to level of illumination,» *Studies in Conservation*, vol. 18, nº 4, pp. 159-166, 1973.
- [58] P. R. BOYCE, «Visual acuity, colour discrimination and light level. 1987. p. 50-57.,» de *Lighting in Museums, Galleries and Historic Houses*, Bristol, 1987.
- [59] G. Thomson, «A new look at colour rendering, level of illumination, and protection from ultraviolet radiation in museum lighting,» *Studies in conservation*, vol. 6, nº 2-3, pp. 49-70, 1961.
- [60] R. MARTÍNEZ LÓPEZ, «El poder del ojo adaptado a la oscuridad,» *Gaceta óptica*, vol. 403, nº 1, pp. 20-24., 2006.
- [61] S. Shevell, *The Science of Color*, Filadelfia, Pensilvania: Elsevier, 2003.
- [62] B. H. CRAWFORD, « Visual adaptation in relation to brief conditioning stimuli,» *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 134, nº 875, pp. 283-302, 1947.
- [63] S. Mayorga Pinilla, D. Vázquez Moliní, A. Álvarez Fernández-Balbuena, G. Hernández Raboso, J. A. Herráez, M. Azcutia y Á. García Botella, « Advanced daylighting evaluation applied to cultural heritage buildings and museums: Application to the Cloister of Santa María El Paular,» *Renewable Energy*, vol. 85, nº C, pp. 1362-1370, 2016.

- [64] M. C. PUELL MARÍN y C. GÓMEZ ABAD, «Visión del contraste mesópica y sensibilidad al deslumbramiento en adultos jóvenes,» *Archivos Optométricos*, vol. 3, nº 1, pp. 19-31, 1999.
- [65] O. M. Blackwell y H. R. Blackwell, «IERI: Visual Performance Data for 156 Normal Observers of Various Ages,» *Journal of the Illuminating Engineering Society*, vol. 1, nº 1, pp. 3-13, 1971.
- [66] European Committee for Standardization (CEN), «EN ISO 105-B02:1999 + A1:2002 E,» European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
- [67] M. Scuello, I. Abramov, J. Gordon y S. Weintraub, « Museum lighting: Why are some illuminants preferred?,» *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 21, nº 2, pp. 306-311, 2004.
- [68] M. Planck, «On The Law of the Energy Distribution in the Normal Spectrum,» *Ann. Phys.*, vol. 4, nº 553, p. 90, 1901.
- [69] International Council Of Museums (ICOM), *Runing a museum: A practical handbook*, Paris: ICOM, 2004.
- [70] R. NARASIMHAN, M. D. AUDEH y J. M. KAHN, «Effect of electronic-ballast fluorescent lighting on wireless infrared links,» *IEE Proceedings-Optoelectronics*, vol. 143, nº 6, pp. 347-354, 1996.
- [71] R. KULLER y T. LAIKE, «The impact of flicker from fluorescent lighting on well-being, performance and physiological arousa,» *Ergonomics*, vol. 41, nº 4, pp. 433-447, 1998.

- [72] J. V. Miller, «Evaluating fading characteristics of light sources,» NoUVIR Research Corporation, Pasadena, 1993.
- [73] R. S. Berns, «Designing white-light LED lighting for the display of art: a feasibility study,» *Color Research and Application*, vol. 36, nº 5, pp. 324-334, 2010.
- [74] J. DRUZIK y B. ESHØJ, «Museum lighting: its past and future development,» de *Museum microclimates*, Copenhagen, National Museum of Denmark, 2007, pp. 51-56.
- [75] S. Staniforth, «Retouching and colour matching: the restorer and metamerism,» *Studies in Conservation*, vol. 30, nº 3, pp. 101-111, 1985.
- [76] A. Sánchez Ortiz y e. al., «Investigación sobre la estabilidad química y óptica de materiales contemporáneos para la reintegración cromática,» de *Procedimientos del IV Congreso del GEIIC*, Madrid, 2009.
- [77] D. Vázquez, J. Muñoz de Luna, A. Álvarez, A. Sánchez y U. Sedano, «Study of chromatic variations between metameres by vaying lighting in the painting "Boy in a turban holding a nosegay" by Michiel Sweerts,» de *Proceedings of SPIE 8550 Optical Systems Design 2012*, Barcelona, 2012.
- [78] T. A. Lignelli, «Use of a rigatino inpainting technique for compensation of losses in panel paintings: a case study,» de *AIC Paintings Specialty Group postprints*, San Diego, California, June

13-14, 1997, San Diego, 1997.

- [79] C. Saiz-Jiménez, S. Cuezva, V. Jurado, A. Fernández-Cortes, E. Porca, D. Benavente, J. C. Cañaveras y S. Sánchez-Moral, «Paleolithic art in peril: policy and science collide Altamira Cave,» *Science*, vol. 334, pp. 42-43, 2011.
- [80] J. Vaquero Turcios, *Maestros subterráneos*, Madrid: Celeste Editorial, 1996.
- [81] M. Bacci, A. Casini, C. Cucci, i. A. Muzz y S. Porcinai, «A study on a set of drawings by Parmigianino: integration of a art-historical analysis with imaging spectroscopy,» *Journal of Cultural Heritage*, vol. 6, nº 4, p. 329-336, 2005.
- [82] R. Gutierrez Rodríguez y R. Ontañón Peredo, «Informe al retirar la luminaria para test de crecimiento de algas bajo radiación visible en la Cueva del Castillo II (113/2010),» *Puente Viesgo*, 2010.
- [83] J. Muñoz de Luna, D. Vázquez Moliní, A. Álvarez Fernández-Balbuena, Á. García Botella, J. A. Herraiz y R. Ontañón, «Selective Spectral LED Lighting System Applied in Paleolithic Cave Art,» *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, vol. 11, nº 4, pp. 223-230, 2015.

¿A dónde vas?

Patatas traigo

